

# **Methodisches Konstruieren für Multi-Material-Bauweisen hergestellt mittels Materialextrusion**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Hagen Johannes Watschke  
aus (Geburtsort): Göttingen

eingereicht am: 21.05.2019  
mündliche Prüfung am: 15.08.2019

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. T. Vietor  
Prof. Dr.-Ing. A. Gebhardt  
Prof. Dr.-Ing. K. Dröder

2019



Für  
meine Familie





## VORWORT

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Konstruktionstechnik der Technischen Universität Braunschweig.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor danke ich besonders für die Betreuung dieser Arbeit sowie die Unterstützung und die konstruktiven Diskussionen, die im Wesentlichen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Gebhardt und Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder für die wertvollen Gespräche und die Übernahme der Gutachterfunktion. Zudem danke ich Frau Prof. Dr.-Ing. Sabine C. Langer für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Mein Dank gilt auch den Mitarbeitenden des Instituts für Konstruktionstechnik der Technischen Universität Braunschweig für die offene Arbeitsatmosphäre sowie die fachlichen Diskussionen und Gespräche, welche mir neue Sichtweisen auf die unterschiedlichen Problemstellungen eröffnet und die Betrachtung alternativer Lösungswege angeregt haben. Weiterhin möchte ich den Studierenden danken, welche durch ihr Mitwirken und ihre Unterstützung – u.a. bei den experimentellen Untersuchungen – ebenfalls zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich während der Zeit des Promotionsvorhabens unterstützt und durch das Schaffen von Freiräumen einen Grundstein für die Erstellung dieser Arbeit gelegt hat.



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>INHALTSVERZEICHNIS .....</b>	<b>VII</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>XI</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>XV</b>
<b>ABKÜRZUNGEN UND INDICES .....</b>	<b>XVII</b>
<b>KURZFASSUNG .....</b>	<b>XIX</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XXI</b>
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangslage und Motivation.....	1
1.2 Problemstellung.....	2
1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise .....	3
<b>2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN UND STAND DER FORSCHUNG .....</b>	<b>7</b>
2.1 Methodische Produktentwicklung.....	7
2.1.1 Einführung .....	7
2.1.2 Phasen der Produktentwicklung.....	8
2.1.3 Produktarchitekturgestaltung .....	11
2.1.4 Konstruktionsprinzipien und Design for X.....	12
2.1.5 Bereitstellung von Produktwissen.....	14
2.2 Grundlagen der Materialextrusion.....	15
2.2.1 Einführung in die additive Fertigung.....	15
2.2.2 Materialextrusion .....	16
2.2.3 Konstruktive Potenziale und Grenzen der Materialextrusion .....	21
2.2.4 Anwendungen mittels Materialextrusion hergestellter Multi-Material-Bauteile.....	25
2.3 Konstruieren für additive Fertigungsverfahren (DfAM).....	27
2.3.1 Kategorisierung bestehender Ansätze des Design for Additive Manufacturing.....	28
2.3.2 Kombinierte Ansätze im Design for Additive Manufacturing.....	29
2.3.3 Opportunistische Ansätze im Design for Additive Manufacturing .....	31
2.3.4 Restriktive Ansätze im Design for Additive Manufacturing .....	33
2.4 Konkretisierung des Forschungsbedarfs.....	34
<b>3 METHODISCHER ANSATZ.....</b>	<b>37</b>
3.1 Zielsetzung und Prämissen .....	37
3.2 Forschungsfragen und Lösungsansatz.....	37
<b>4 ENTWICKLUNG EINES ANSATZES ZUR WISSENSBEREITSTELLUNG .....</b>	<b>41</b>
4.1 Aufstellen von Anforderungen an das zu entwickelnde Wissenssystem .....	41
4.1.1 Auffinden benötigter Informationen .....	42
4.1.2 Repräsentation der Informationen und Entscheidungsunterstützung.....	43
4.2 Struktur und Inhalte des Wissenssystems .....	44
4.2.1 Identifikation von Konstruktionsprinzipien.....	45

4.2.2 Entwicklung von Lösungskonzepten .....	46
4.3 Zusammenfassung .....	48
<b>5 AUFBEREITUNG VON KONSTRUKTIONSPRINZIPIEN FÜR DIE MMM .....</b>	<b>49</b>
5.1 Vorgehen zur Identifikation und Ableitung von Konstruktionsprinzipien .....	49
5.1.1 Ableitung von Konstruktionsprinzipien anhand von Anwendungen .....	50
5.1.2 Ableitung von Konstruktionsprinzipien anhand von Eigenschaftskombinationen ..	51
5.1.3 Identifikation von Konstruktionsprinzipien mittels experimenteller Untersuchungen .....	52
5.2 Wissensaufbereitung von Konstruktionsprinzipien für die MMM .....	53
5.3 Ableitung spezifischer Konstruktionsprinzipien .....	56
5.4 Integration der Wissensbereitstellung für den Konzeptionsprozess .....	59
5.4.1 Strukturierung und Aufbau der Workshops .....	59
5.4.2 Ergebnisse der Workshops .....	60
5.5 Zusammenfassung .....	62
<b>6 SCHICHTVERBUNDGESTALTUNG .....</b>	<b>63</b>
6.1 Charakterisierung der Schichtverbundhaftung .....	63
6.1.1 Entwicklung von Prüfkörpern zur Ermittlung der Verbundhaftung .....	64
6.1.2 Validierung der Prüfkörper anhand von experimentellen Untersuchungen .....	65
6.2 Identifikation von Einflussfaktoren auf die Schichtverbundgestaltung .....	70
6.2.1 Material- und anlagenspezifische Einflussfaktoren .....	70
6.2.2 Prozessspezifische Einflussfaktoren .....	71
6.2.3 Konstruktive sowie vor- und nachbehandlungsspezifische Einflussfaktoren .....	72
6.3 Untersuchung ausgewählter Maßnahmen zur Schichtverbundgestaltung .....	72
6.3.1 Experimentelle Untersuchung von Maßnahmen zur Steigerung der Verbundhaftung .....	73
6.3.2 Experimentelle Untersuchungen zur konstruktiven Schichtverbundgestaltung .....	75
6.4 Entscheidungsunterstützung zur Schichtverbundgestaltung .....	79
6.5 Zusammenfassung .....	80
<b>7 ERMITTLUNG AUSGEWÄHLTER KENNWERTE UND PROTOTYPISCHE UMSETZUNG DES WISSENSSYSTEMS .....</b>	<b>81</b>
7.1 Charakterisierung additiv gefertigter Akustischer Schwarzer Löcher .....	81
7.1.1 Kennwertermittlung in Bezug auf die Verbundhaftung und Biegeeigenschaften ...	81
7.1.2 Experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung des Schwingungsverhaltens .....	84
7.2 Charakterisierung additiv gefertigter wärmeabstrahlender Strukturen .....	88
7.2.1 Ermittlung prozessspezifischer Einflussfaktoren auf den elektrischen Widerstand	88
7.2.2 Exemplarische Realisierung additiv gefertigter wärmeabstrahlender Strukturen ...	96
7.3 Prototypische Umsetzung und Anwendung der Wissensbereitstellung .....	102
7.3.1 Prototypische Umsetzung des Wissenssystems .....	102
7.3.2 Exemplarische Anwendung der Wissensbereitstellung .....	104
7.4 Zusammenfassung .....	108
<b>8 SCHLUSSBETRACHTUNGEN UND AUSBLICK .....</b>	<b>111</b>
8.1 Zusammenfassung .....	111
8.2 Ausblick .....	113

<b>9 LISTE EIGENER VERÖFFENTLICHUNGEN .....</b>	<b>115</b>
<b>10 LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>117</b>
<b>A KONSTRUKTIONSPRINZIPIEN FÜR DIE MMM .....</b>	<b>137</b>
A.1 Auswahl identifizierter Konstruktionsprinzipien .....	137
<b>B SCHICHTVERBUNDGESTALTUNG .....</b>	<b>139</b>
B.1 Charakterisierung der Schichtverbundhaftung .....	139
B.2 Experimentelle Untersuchungen zur Verbundhaftung .....	141
<b>C KENNWERTERMITTLUNG.....</b>	<b>143</b>
C.1 Charakterisierung von dämpfenden Strukturen.....	143
C.2 Charakterisierung von elektrisch leitfähigen Strukturen.....	144



## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1.1:	Aufbau der Arbeit .....	4
Abbildung 2.1:	Schematische Darstellung der Produktarchitektur mit den Beziehungen zwischen der funktionalen und physischen Beschreibung des Produktes (angelehnt an [Fel13, 258 f.]) .....	11
Abbildung 2.2:	Verfahrensprinzip der Materialextrusion und der Darstellung des Materialübergangs und relevanter Adhäsionsmechanismen in Bezug auf eine MMM (angelehnt an [Awa09; Ott14, 12; Sch09, 13]) .....	18
Abbildung 2.3:	Darstellung wesentlicher Prozessparameter zur Erzeugung einer Schicht (angelehnt an [Moh15]) .....	20
Abbildung 2.4:	Häufig eingesetzte und mittels MEX verarbeitbare thermoplastische Kunststoffe (Darstellung angelehnt an [Geb16, 477], basierend auf [Bau13; Ehr11; Geb16; Roo15; Rie12, 36]) .....	21
Abbildung 2.5:	Ausgewählte additiv gefertigte Multi-Material-Bauteile: (a) Gelenk mit integriertem piezoresistiven Sensor [Wat19c], (b) integrierte Dämpfungsstruktur, (c) integrierte wärmeerzeugende Struktur kombiniert mit einem thermochromen Material [Wat19a], (d) additiv gefertigte Leiterbahnen zur Steuerung von LEDs, (e) faltbare Struktur mit Gelenken (SMP) [Sch19] (selbst erstellte Fotoaufnahmen) .....	26
Abbildung 2.6:	Kategorisierung bestehender methodischer Ansätze im Bereich des DfAM (basierend auf [Kum16]) .....	28
Abbildung 2.7:	DfAM-Vorgehensmodell, basierend auf VDI-Richtlinie 2221 (1993), entwickelt nach [Kum16; Kum18] (Abbildung basierend auf [Wat16]) .....	30
Abbildung 3.1:	Darstellung des in der Arbeit gewählten Lösungsansatzes zur Beantwortung der Forschungsfragen .....	38
Abbildung 4.1:	Aufbau und Inhalte des Wissenssystems .....	44
Abbildung 4.2:	Zugriffslogik und Prinzipienaufbereitung (basierend auf [Wat19c]) .....	46
Abbildung 4.3:	Konkretisierung von Lösungsprinzipien durch Betrachtung verfahrensspezifischer Gestaltungsmöglichkeiten und Grenzen sowie der Materialkompatibilität (basierend auf [Wat19c]) .....	47
Abbildung 5.1:	Möglichkeiten zur Identifikation von Prinzipien für die MMM .....	49
Abbildung 5.2:	Maske zur Ableitung von Konstruktionsprinzipien anhand von bestehenden Anwendungsbeispielen für die MMM .....	50
Abbildung 5.3:	Analyse eines mittels MMM hergestellten Sensors zur Messung von Verformungen, bestehend aus einem flexiblen Material und einem Material mit piezoresistiven Eigenschaften (Bild aus [Lei12]) .....	50
Abbildung 5.4:	Darstellung des Funktionsprinzips des ASL-Effekts mit Dämpfungsschicht (basierend auf [Rot17]) .....	53
Abbildung 5.5:	Additiv gefertigte Balkenstruktur mit integriertem ASL (a) ohne und (b) mit zusätzlicher Dämpfungsstruktur aus einem flexiblen Material (vgl. [Rot18]) .....	53
Abbildung 5.6:	Prinzipaufbereitung Beispiel 1 – Teil 1 (basierend auf [Rot17; Wat19c]) .....	56
Abbildung 5.7:	Prinzipaufbereitung Beispiel 1 – Teil 2 (basierend auf [Rot17; Rot18; Wat19c]) .....	57
Abbildung 5.8:	Prinzipaufbereitung Beispiel 2 – Teil 1 (basierend auf [Wat17a; Wat19a]) ....	58
Abbildung 5.9:	Prinzipaufbereitung Beispiel 2 – Teil 2 (basierend auf [Wat19a]) .....	58

Abbildung 6.1:	Isometrische Ansicht der entwickelten Prüfkörper zur Charakterisierung der Verbundhaftung für die Zug- (links), Zugscher- (Mitte) und Druckscherbelastung (rechts) (angelehnt an [Wat18]) .....	64
Abbildung 6.2:	Isometrische Ansicht des entwickelten Prüfkörpers zur Charakterisierung der Verbundhaftung unter Schälbelastung (angelehnt an [Fre19]).....	65
Abbildung 6.3:	Übersicht der experimentell ermittelten Spannungen bzw. des Schälwiderstands für die unterschiedlichen Prüfkörper mit Angabe der Standardabweichungen (basierend auf [Wat18]).....	66
Abbildung 6.4:	Aufbau und Kraft-Weg-Diagramm des Zugversuchs (vgl. [Wat18]).....	67
Abbildung 6.5:	Aufbau und Kraft-Weg-Diagramm des Zugscherversuchs (vgl. [Wat18]) .....	68
Abbildung 6.6:	Aufbau und Kraft-Weg-Diagramm des Druckscherversuchs (vgl. [Wat18])...	68
Abbildung 6.7:	Aufbau und Schälwiderstand-Weg-Diagramm des Rollenschälversuchs .....	69
Abbildung 6.8:	Gegenüberstellung der Schälwiderstände mit und ohne Maßnahme (basierend auf [Fre19]).....	73
Abbildung 6.9:	(a) Plasmavorbehandlung und (b) Nut-Feder-Struktur nach der Prüfung (basierend auf [Fre19]) .....	74
Abbildung 6.10:	Darstellung einer dreidimensionalen und gradierten formschlüssigen Verbindung, bestehend aus einem PP-Grundkörper und einer flächigen ABS-Struktur (basierend auf [Fre19; Wat19b]) .....	75
Abbildung 6.11:	Darstellung des (a) Versuchsaufbaus und (b) ausgewählter Bruchbilder (basierend auf [Wat19b]).....	76
Abbildung 6.12:	Ergebnisse der Zugscherversuche gegliedert nach Zellgeometrie [Wat19b] ...	77
Abbildung 6.13:	Darstellung des (a) Versuchsergebnisses der (b) Multi-Material-Probe mit integrierter Fügefläche aus ABS und PP-Grundkörper zur Demonstration der Anwendung eines gitterförmigen Formschlusses mit (c) ausgewählten Bruchbildern (basierend auf [Wat19b]).....	78
Abbildung 6.14:	Entscheidungsunterstützung zur Schichtverbundgestaltung (siehe [Fre19])....	79
Abbildung 7.1:	Übersicht Schälwiderstände unterschiedlicher Materialkombinationen (basierend auf [Fre19]) .....	82
Abbildung 7.2:	Abmessungen der Balkenprobe mit der ASL-Struktur auf der linken Seite (basierend auf [Rot18]).....	84
Abbildung 7.3:	Exemplarische Darstellung der Balkenkonfiguration (b) ohne (vorne, Bezeichnung M_09) und (c) mit Dämpfungsmaterial (hinten, Bezeichnung M_11) .....	85
Abbildung 7.4:	Darstellung der Frequenzantwort des Vollbalkens (Konfiguration (a)) mit schematischer Darstellung des Peak-Amplitude Verfahrens zur Bestimmung des Dämpfungsgrads (siehe [Moe10]).....	86
Abbildung 7.5:	Darstellung des interpolierten Dämpfungsverlaufs; Konfiguration (a) bis (d).	86
Abbildung 7.6:	Darstellung des interpolierten Dämpfungsverlaufs; Konfiguration (c) bis (g).	87
Abbildung 7.7:	(a) Darstellung additiv gefertigter Balkenstrukturen mit integrierten ASL unterschiedlicher Formfunktionen [Rot17] und (b) Variante einer Integrationsmöglichkeit eines ASL in eine Plattenstruktur .....	87
Abbildung 7.8:	Übersicht der spezifischen Widerstände der untersuchten Materialien mit Darstellung des jeweils besten Prozessparametersatzes je Füllmusterorientierung (basierend auf [Wat19a]) .....	90



Abbildung 7.9:	Übersicht des spezifischen Widerstands (PPC/3dk) in Abhängigkeit von der Füllmusterorientierung, der Extrusionstemperatur, der Flussrate und der Geschwindigkeit (basierend auf [Wat19a]) .....	91
Abbildung 7.10:	Übersicht des spezifischen Widerstands (FFE/M3D) in Abhängigkeit von der Füllmusterorientierung, der Extrusionstemperatur, der Flussrate und der Geschwindigkeit (basierend auf [Wat19a]) .....	92
Abbildung 7.11:	Darstellung der Strom-Spannungs-Kennlinie, der elektrischen Leistung, des Widerstands und der Aufheizkurven für PPC in Abhängigkeit von der Füllmusterorientierung (basierend auf [Wat19a]) .....	94
Abbildung 7.12:	Darstellung der Strom-Spannungs-Kennlinie, der elektrischen Leistung, des Widerstands und der Aufheizkurven für FFE in Abhängigkeit von der Füllmusterorientierung (basierend auf [Wat19a]) .....	95
Abbildung 7.13:	Darstellung der Strom-Spannungs-Kennlinie, der elektrischen Leistung, des Widerstands und der Aufheizkurven für M3D in Abhängigkeit von der Füllmusterorientierung (basierend auf [Wat19a]) .....	95
Abbildung 7.14:	Darstellung der Aufheiz- und Abkühlkurve sowie der Wärmeverteilung der Oberflächentemperatur der Flächenheizungsstruktur bei einer angelegten Spannung von 6 V (vgl. [Wat19a]).....	97
Abbildung 7.15:	Darstellung der Strom-Spannungs-Kennlinie, des Verlaufs der Leistung und des Widerstands über die Spannung sowie des Farbwechsels des Matrixpolymers (basierend auf [Wat19a]).....	97
Abbildung 7.16:	Darstellung einer integrierten Heizstruktur aus FFE mit Bereichen unterschiedlicher Geometrie und Füllmusterorientierung sowie Bereichen zur Aufnahme von Strom-Spannungs-Kennlinien.....	98
Abbildung 7.17:	Oberflächentemperatur der Flächenheizungsstruktur mit diskreten Übergängen zwischen den Einzelsegmenten für unterschiedliche Spannungen.....	99
Abbildung 7.18:	Strom-Spannungs-Kennlinie, elektrische Leistung, elektrischer Widerstand und Aufheizkurven der Heizstruktur, gegliedert nach den Einzelsegmenten.....	99
Abbildung 7.19:	Additiv gefertigte Gitterstruktur aus dem CNT-gefüllten elektrisch leitfähigen Polymer (FFE) und eine Wärmebildaufnahme bei einer angelegten Spannung von 5 V nach 120 Sekunden .....	100
Abbildung 7.20:	Darstellung einer dreidimensionalen Gitterstruktur aus PPC zur Integration in eine Luftführung in Multi-Material-Bauweise während des Herstellungsprozesses sowie nach Fertigstellung mit dazugehörigen Wärmebildaufnahmen bei einer Spannung von 30 V .....	101
Abbildung 7.21:	Screenshot des Datenbanksystems mit Darstellung des funktionsorientierten Zugriffs und Beschreibung des Konstruktionsprinzips zur Integration von passiven Dämpfungsstrukturen [Wat19c].....	102
Abbildung 7.22:	Screenshots des Datenbanksystems mit Darstellung der Stellhebel und der Konstruktionshinweise (oben) sowie den Materialkompatibilitäten (unten) [Wat19c] .....	103
Abbildung 7.23:	Vorgehen zur Neukonzeption der Handprothese unter Berücksichtigung der konstruktiven Möglichkeiten der MMM und der Nutzung des Datenbanksystems (basierend auf [Wat19c]) .....	105

Abbildung 7.24: (a) Funktionsstruktur zur Identifikation von Konstruktionsprinzipien (grau hinterlegt) und (b) Morphologischer Kasten mit identifizierten Teillösungen zur Realisierung der Teilfunktionen .....	105
Abbildung 7.25: Additiv gefertigter Prototyp der Handprothese mit Darstellung einzelner Konstruktionsmerkmale; zweiteilige Struktur, bestehend aus Finger und Sensor, jeweils in Multi-Material-Bauweise hergestellt (Fingergeometrie angelehnt an [Sch12]) .....	107
Abbildung 7.26: Demonstration der Funktionsweise des integrierten piezoresistiven Sensors zum Detektieren einer Verformung des oberen Gelenks.....	108
Abbildung B.1: Abmessungen der entwickelten Prüfkörper zur Charakterisierung der Verbundhaftung in Millimeter für die unterschiedlichen Belastungsarten (a) Zug, (b) Zug-Scher, (c) Druck-Scher (Skalierung 2:1) und (d) Schälung (basierend auf [Fre19; Wat18]) .....	140
Abbildung B.2: Bruchbilder der Versuche zur Ermittlung der Verbundfestigkeit für die Materialkombination PLA und ABS für die Belastungen (a) Zug, (b) Zugscher und (c) Druckscher (basierend auf [Wat18]) .....	141
Abbildung B.3: Aufnahmen des mittels Laser-Scanning-Mikroskop ermittelten Höhenprofils einer (a) nicht geglätteten mit $R_c \approx 35 \mu\text{m}$ und (b) geglätteten Probe $R_c \approx 26 \mu\text{m}$ (basierend auf [Fre19]).....	141
Abbildung B.4: Schematische Darstellung der für die mechanische Verankerung genutzten Nut-Feder-Verbindung .....	142
Abbildung C.1: Aufbau des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 178 [DIN17c].....	143
Abbildung C.2: Versuchsaufbau der Dämpfungsmessung ( [Rot18]).....	143
Abbildung C.3: Probekörper zur Charakterisierung des (a) spezifischen Widerstands und zur Ermittlung der (b) Strom-Spannungs-Kennlinien der wärmeabstrahlenden Strukturen (basierend auf [Wat19a]) .....	144
Abbildung C.4: Messaufbau zur (a) Ermittlung des spezifischen Widerstands und (b) zur Charakterisierung der Probekörper zur Bestimmung der Strom-Spannungs-Kennlinien (basierend auf [Wat19a]) .....	145
Abbildung C.5: Verformung einer Probe aus FFE (Füllmusterorientierung $0^\circ$ ) und der maximalen Oberflächentemperatur infolge der Erwärmung nach Anlegen einer Spannung von 12 V (basierend auf [Wat19a]) .....	146
Abbildung C.6: Schädigung der Probe, gefertigt aus M3D auf der Ober- und Unterseite infolge der Erweichung des Matrixpolymers bei der Erwärmung (vgl. [Wat19a])....	146

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1:	Gegenüberstellung ausgewählter additiver Fertigungsverfahren bezüglich Multi-Material-Fähigkeit .....	17
Tabelle 2.2:	Beeinflussung von Verfahrensparametern der MEX auf ausgewählte Bauteileigenschaften .....	23
Tabelle 2.3:	Tabellarische Einordnung der vorgestellten DfAM-Ansätze in die einzelnen Konstruktionsphasen und Bewertung hinsichtlich einer expliziten Berücksichtigung von Möglichkeiten zur Funktionsintegration und der Besonderheiten von MMAM aufbauend auf [Kum16].....	35
Tabelle 5.1:	Gegenüberstellung von Materialeigenschaften zur Identifikation von Konstruktionsprinzipien für die MMM (Auswahl).....	51
Tabelle 5.2:	Identifikation von Konstruktionsprinzipien für die MMM in Bezug auf das Bereitstellen thermischer Energie sowie das Bereitstellen/Stoppen elektrischer Energie (basierend auf [Wat19a]) .....	52
Tabelle 5.3:	Beispielhafte Zuordnung von ausgewählten Konstruktionsmerkmalen und Prozessparametern zu prinzipispezifischen Eigenschaften im Hinblick auf deren gezielte Berücksichtigung in der Konzeption .....	55
Tabelle 6.1:	Übersicht der Verfahrensparameter und Prüfbedingungen, gegliedert nach Prüfkörpertyp bzw. Materialkombination (basierend auf [Wat18]) .....	65
Tabelle 6.2:	Material- und anlagenspezifische Einflussfaktoren auf die Verbundhaftung (basierend auf [Fre19]) .....	70
Tabelle 6.3:	Übersicht prozessspezifischer Einflussfaktoren auf die Verbundhaftung (basierend auf [Fre19]) .....	71
Tabelle 6.4:	Zusatzmaßnahmen und konstruktive Einflussfaktoren auf die Verbundhaftung (basierend auf [Fre19]) .....	72
Tabelle 6.5:	Übersicht der verwendeten Materialien und genutzten Verfahrensparameter (basierend auf [Fre19]) .....	73
Tabelle 6.6:	Versuchsaufbau zur Ermittlung der Einflüsse von Zellgeometrie, Zellanzahl und des Gradienten des Stabdurchmessers (basierend auf [Wat19b]).....	76
Tabelle 7.1:	Übersicht über die geprüften Materialkombinationen mit Angabe der verwendeten Verfahrensparameter, gegliedert nach Materialien (basierend auf [Fre19]) .....	82
Tabelle 7.2:	Verwendete Prozessparameter zur Bestimmung des statischen Biegemoduls ..	83
Tabelle 7.3:	Nach DIN EN ISO 178 ermittelter Biegemodul .....	84
Tabelle 7.4:	Übersicht der zur Anregung der Balken genutzten Signaltypen.....	85
Tabelle 7.5:	Übersicht der untersuchten Balkenkonfigurationen.....	85
Tabelle 7.6:	Übersicht der in den experimentellen Untersuchungen verwendeten Materialien mit Angabe der elektrischen Leitfähigkeit der Halbzeuge und der empfohlenen Verarbeitungsbedingungen .....	89
Tabelle 7.7:	Übersicht der prozessspezifischen Variationsparameter zur Charakterisierung des Einflusses auf die elektrische Leitfähigkeit (basierend auf [Wat19a]).....	89
Tabelle A.1:	Sammlung ausgewählter Konstruktionsprinzipien für die MMM (aufbauend auf [Wat19c]) .....	137

Tabelle A.2:	Einordnung der identifizierten Konstruktionsprinzipien in die Zugriffslogik (basierend auf [Wat19c]) .....	138
Tabelle B.1:	Übersicht unterschiedlicher Studien zur Charakterisierung von mittels MEX hergestellter Prüfkörper unter Angabe der betrachteten Prozessparameter (basierend auf [Wat18]) .....	139
Tabelle C.1:	Übersicht ausgewählter Studien zur Identifikation von prozessspezifischen Einflussfaktoren auf den elektrischen Widerstand von mittels MEX hergestellter Strukturen (basierend auf [Wat19a]) .....	144
Tabelle C.2:	Übersicht der Prozessparameter mit niedrigem spezifischen Widerstand und geringer Standardabweichung pro Kombination aus Material und Füllmusterorientierung (basierend auf [Wat19a]) .....	146

## ABKÜRZUNGEN UND INDICES

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer
AM	Additive Manufacturing
ASA	Acrylnitril-Styrol-Acrylat-Copolymere
ASL	Akustisches Schwarzes Loch
CB	Carbon Black
CNT	Carbon Nanotubes
CNW	Copper Nanowires
DED	Directed Energy Deposition
DTM	Design Theory and Methodology
HIPS	High Impact Polystyrol
MEX	Materialextrusion
MJM	Multi-Jet-Modeling
MMAM	Multi-Material Additive Manufacturing
MMB	Multi-Material-Bauweise
MMM	Multi-Material-Materialextrusion
PA	Polyamid
PBF	Pulverbettbasiertes Schmelzen
PC	Polycarbonat
PCL	Polycaprolacton
PE	Polyethylen
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimid
PEP	Produktentwicklungsprozess
PET	Polyethylenterephthalat
PJM	Poly-Jet-Modeling
PLA	Polylactid
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PVA	Polyvinylalkohol
SMA	Shape Memory Alloy
SMP	Shape Memory Polymer
TPU	Thermoplastisches Polyurethan



## KURZFASSUNG

Die additive Fertigung bietet gegenüber anderen Fertigungsverfahren neue Freiheiten in der Produktgestaltung. Neben der Herstellung von Prototypen hat sich die direkte Fertigung von Endprodukten etabliert. Eine Besonderheit additiver Fertigungsverfahren stellt die Möglichkeit der Kombination mehrerer Materialien innerhalb eines Bauteils ohne zusätzlichen Fügeprozess dar. Hieraus leitet sich ein hohes Potenzial zur Integration von Funktionen und für die Entwicklung neuer Bauteildesigns ab. Das Verfahren der Materialextrusion eignet sich infolge der vergleichsweise einfachen Handhabung und der verfügbaren Materialvielfalt an Polymeren und Kompositmaterialien für die Herstellung additiv gefertigter Multi-Material-Bauweisen. Aufgrund von fehlendem Wissen über die zusätzlichen Gestaltungsmöglichkeiten werden diese innerhalb der Bauteilkonzeption bisher kaum berücksichtigt. Eine gezielte Nutzung der neuen konstruktiven Freiheiten erfordert eine spezielle Bereitstellung von Gestaltungs- und Technologiewissen. Zur Ausschöpfung der konstruktiven Freiheiten und einer generellen Berücksichtigung der technischen Umsetzbarkeit innerhalb des Konzeptionsprozesses werden neben der Bereitstellung von Gestaltungswissen auch Informationen in Bezug auf die Schichtverbundgestaltung benötigt.

In dieser Arbeit wird ein methodischer Ansatz entwickelt, um die konstruktiven Möglichkeiten additiv gefertigter Multi-Material-Bauweisen, speziell für das Verfahren der Materialextrusion, systematisch mit in die Bauteilkonzeption einzubeziehen. Zur Bereitstellung von detailliertem Gestaltungswissen werden zum einen Konstruktionsprinzipien identifiziert und anhand von experimentellen Untersuchungen Kennwerte zur Integration von dämpfenden und wärmeerzeugenden Strukturen ermittelt. Zum anderen werden auf der Grundlage der Versuchsergebnisse material-, geometrie- und prozessseitige Einflussfaktoren auf die resultierenden Bauteileigenschaften analysiert. Hieraus werden anschließend Stellhebel abgeleitet. Zur Berücksichtigung der Materialkompatibilität innerhalb des Konzeptionsprozesses werden Prüfkörper zur Quantifizierung der Verbundhaftung entwickelt. Zudem wird die Wirksamkeit unterschiedlicher Zusatzmaßnahmen, u.a. formschlüssige Verbindungen, experimentell bestimmt. Die Integration der Wissensbereitstellung in den Produktentwicklungsprozess sowie die Art der Wissensaufbereitung wird anhand von Workshops evaluiert. Um die Anwendbarkeit des Gestaltungswissens zu erleichtern, wird ein Graphendatenbanksystem prototypisch umgesetzt. Die Anwendung der Wissensbereitstellung wird am Beispiel der Neukonzeption einer Handprothese in Multi-Material-Bauweise demonstriert. Das Potenzial des entwickelten Konzepts sowie dessen grundsätzliche technische Umsetzbarkeit wird abschließend durch die Fertigung mittels Materialextrusion aufgezeigt.





## ABSTRACT

Compared to other manufacturing processes, additive manufacturing offers new freedoms in product design. In addition to the production of prototypes, the manufacturing of end-use products is established. Additive manufacturing processes provide the possibility of combining several materials within one component without the need for an additional joining process. This offers a high potential for function integration and the development of new product designs. Material extrusion is suitable for the manufacturing of multi-material parts due to its comparatively simple handling and the large variety of polymers and composite materials. However, due to lack of knowledge about the additional capabilities, these design potentials are rarely considered within conceptual design. A goal-oriented utilization of the new design freedom requires a specific provision of knowledge with regard to knowledge of design and technology. This includes not only information about design and process-specific possibilities for adjustment of specific part properties, but also knowledge related to interface design.

In this thesis, a methodological approach is developed to systematically take into account the design potentials of additively manufactured multi-material designs within the product development process particularly for material extrusion. In order to provide specific design knowledge, solution principles are identified and characteristics for the integration of damping structures and heat radiant surfaces are determined on the basis of experimental investigations. In addition, geometry and process-related levers are analyzed based on the results of the experiments. In order to consider material compatibility within the conceptual design, test specimens for the characterization of the interface bonding strength are developed. Furthermore, additional measures for increasing the interface strength are experimentally determined, such as mechanical interlocking. The integration of the provision of knowledge into the product development process and the type of knowledge preparation are evaluated by means of workshops. In order to facilitate the applicability of the specific design knowledge, a graph database system is finally implemented prototypically. The application is carried out through redesign of a hand prosthesis by using multiple materials. Finally, the potential of the new concept and a general technical feasibility are demonstrated by manufacturing with material extrusion.



# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Ausgangslage und Motivation

Additive Fertigungsverfahren bieten als Verfahrensgruppe gegenüber traditionellen subtraktiven oder werkzeuggestützten Verfahren neue Freiheiten in der Gestaltung von Produkten. Sie haben sich u.a. deshalb neben der alleinigen Herstellung von Prototypen auch in der Fertigung von Betriebsmitteln, Werkzeugen und Endprodukten in Kleinserien als Ergänzung zu konventionellen Fertigungsverfahren etabliert [Geb16; Gib15; Woh18]. Der Wohlers Report 2018 [Woh18] zeigt, dass der Anteil additiv gefertigter Funktionsbauteile mit 33,1% bereits den Anteil prototypischer Anwendungen (31,1%) übersteigt. Neben der Verfahrensgruppe des pulverbettbasierten Schmelzens für Polymere und Metalle hat sich die Materialextrusion (MEX) zur Fertigung von Funktionsbauteilen, Werkzeugen und Betriebsmitteln bewährt [Geb16, 260; Woh18]. Dies ist einerseits auf die werkzeuglose Herstellung komplexer Bauteilgeometrien, wie topologieoptimierter Leichtbaustrukturen, zurückzuführen, die durch den schichtweisen Materialauftrag ermöglicht werden. Andererseits wird diese Entwicklung durch marktbedingte Bedürfnisse nach kürzeren Produktlebenszyklen und individualisierten bzw. personalisierten Produkten vorangetrieben. Hieraus resultieren stetige Verbesserungen in Bezug auf die einzelnen Fertigungstechnologien im Bereich der Anlagentechnik und Software sowie Weiterentwicklungen seitens der verfügbaren Materialien und deren Eigenschaften [Bau16; Cam12; Gao15; Geb16; Tho16]. Ein weiterer Aspekt, welcher die industrielle Anwendung additiver Fertigungsverfahren im Bereich der direkten Herstellung von Endprodukten begünstigt, ist die fortschreitende Etablierung internationaler Standards und Richtlinien. Diese reichen von Terminologien, Verfahrensbeschreibungen und Qualifizierung von Ausgangswerkstoffen [DIN16a; DIN18a] über Standards zur Qualitätssicherung und zu Prüfverfahren [DIN18b; DIN16b] bis hin zu allgemeinen Konstruktionsempfehlungen [DIN17a; DIN17b; VDI15] und Prüfkörpern zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Bauteilgestaltung [DIN18c].

Häufig wird die Möglichkeit der additiven Fertigung (engl. additive manufacturing, AM) allerdings zu spät im Produktentwicklungsprozess in Erwägung gezogen, sodass eine Neukonzeption des Bauteils unter ganzheitlicher Betrachtung der neuen Gestaltungsfreiheiten (z.B. Prinzipvariation) nicht mehr bzw. nur eingeschränkt möglich ist [Bau16; Pra18a; Wei18; Yan18; Zhu17a]. Um das volle Potenzial der neuen konstruktiven Möglichkeiten der additiven Fertigung bspw. in Bezug auf Funktionsintegration systematisch nutzen zu können, ist ein Überdenken der Produktarchitekturgestaltung und somit eine Neukonzeption des Produkts erforderlich [Lav15; Yan16]. Neben Erfahrungen und Wissen im Bereich des fertigungsgerechten Konstruierens im Kontext der additiven Fertigung mangelt es dem/der Produktentwickler/in<sup>1</sup> vor allem an spezifischem Wissen bezüglich der gestalterischen Potenziale [Pra18a; See14; See17; Tho16; Zhu17a]. Um vor allem letztere zielgerichtet und bereits frühzeitig in der Produktentwicklung berücksichtigen zu können, werden im Forschungsfeld des *Design for Additive Manufacturing* (DfAM) verstärkt Methoden und Hilfsmittel zur Wissensbereitstellung entwickelt, die eine Berücksichtigung der AM-spezifischen Potenziale und Grenzen erleichtern. Diese Methoden umfassen Vorgehensmodelle [Kum16; Kum18; Yan15a; Yao18b; Lav17], die vorhandene Richtlinien um Besonderheiten der additiven Fertigung erweitern, Katalog- oder Datenbanksysteme zur Bereitstellung spezifischer Gestaltungs-

---

<sup>1</sup> In dieser Arbeit wird nachfolgend auf eine geschlechtsspezifische Doppelbezeichnung verzichtet, wobei die Einzelbezeichnungen inklusiv gemeint sind.

möglichkeiten [BM12; Wei16; Wei18] sowie Regelsammlungen zur Gewährleistung der Herstellbarkeit speziell in Bezug auf verfahrensspezifische geometrische Restriktionen [Ada14; Ada15; Hoc08].

Treiber für den Einsatz additiver Fertigungsverfahren sind u.a. die Integralbauweise und die Funktionsintegration bzw. -erweiterung [Bec05; Geb13, 427; Geb16, 464; Gib15; Pra18a; Sch16; Wei18; Yan15a; Yan15b; Yan16]. Das Verfahrensprinzip des schichtweisen Materialauftrags ermöglicht in diesem Zusammenhang sowohl die Fertigung von beweglichen Baugruppen ohne zusätzlichen Montageprozess als auch das Einbetten von zusätzlichen Komponenten während der Fertigung sowie die Kombination unterschiedlicher Materialien ohne zusätzlichen Fügeprozess [Gib15; Ros07; Ros14]. Letzteres ermöglicht die Integration zusätzlicher materialspezifischer Funktionen und eröffnet zukünftig große Möglichkeiten für innovative Produktdesigns bspw. durch die Integration sensorischer, elektrisch leitender oder dämpfender Funktionen bzw. Strukturen. Getrieben durch das Potenzial, leichtere Bauteile mit reduziertem Bauraum und gesteigerter Funktionalität herstellen zu können, schreiten die Prozesstechnik und Materialforschung diesbezüglich kontinuierlich voran [Fis18; Gao15; Liu18; Ngo18; Tho16; Vae13; Yao18b].

## 1.2 Problemstellung

Die Erforschung der Gestaltungs- und Einsatzmöglichkeiten additiv gefertigter Multi-Material-Bauteile durch Kombination mehrerer Werkstoffe einer Materialklasse nimmt stetig zu. Unterschiedliche Anwendungen mit lokal integrierten, elektrisch leitenden und sensorischen Funktionen [Ham17; Liu18; Vae13; Tho16], elastischen bzw. dämpfenden Elementen [Gao15; Rot17; Rot18; Wee19] oder optischen Funktionen [Fis18] wurden bereits demonstriert. Das Verfahren der Materialextrusion eignet sich aufgrund der einfachen Handhabung des Prozesses und der vergleichsweise großen Materialvielfalt von thermoplastischen Kunststoffen und Elastomeren sowie Kompositmaterialien mit unterschiedlichen Füllstoffen gut für die additive Fertigung von Multi-Material-Bauweisen (MMB) mit diskreten Materialübergängen [Fis18; Liu18; Vae13]. Die Herstellung von Bauteilen in MMB bringt neben den konstruktiven Freiheiten in der Bauteilgestaltung auch Herausforderungen in Bezug auf die Konzeption und Auslegung mit sich. Hierbei kommt dem Schichtverbund zwischen den einzelnen Materialien eine Schlüsselrolle zu [Fis18, 81; Vae13].

Aufgrund unzureichender Erfahrungen und mangelndem Wissen in Bezug auf die neuen konstruktiven Freiheiten der additiven Fertigung im Allgemeinen und der MMB im Speziellen ist eine Berücksichtigung der damit einhergehenden Potenziale in der Produktentwicklung kaum möglich, sodass diese derzeit weitestgehend ungenutzt bleiben. Verfügbare Sammlungen von Heuristiken und Konstruktionsprinzipien im Forschungsfeld des DfAM spezifizieren die Besonderheiten der Multi-Material additiven Fertigung (engl. multi-material AM, MMAM) und die daraus resultierenden konstruktiven Möglichkeiten kaum [BM12; Blo17; Blo19; Kum17a; Wei16]. Zudem erfordert eine systematische Berücksichtigung dieser neuen Gestaltungsfreiheiten in der Produktentwicklung eine Einbettung der bisher isolierten Ansätze zur Wissensbereitstellung in die allgemeine Konstruktionsmethodik im Sinne von Pahl/Beitz [Fel13] und dem Vorgehen nach VDI-Richtlinie 2221 [VDI18a]. Durch eine abstrakte und modellbasierte Problemformulierung wird die Loslösung von Designfixierungen forciert und so eine Erweiterung des Lösungsraums für alternative Lösungskonzepte durch eine Variation von Konstruktionsprinzipien ermöglicht, basierend auf einem funktionsorientierten Zugriff [Boy14; Jan91; Ric18; Sto99; Yan16; Yan18].

Neben Bauteilgeometrie und -orientierung werden die resultierenden Bauteileigenschaften, wie mechanische [Ahn02; Moh15] oder elektrische Eigenschaften [Ham17; Wat17a], in der additiven Fertigung und speziell der MEX maßgeblich durch die gewählten Prozessparameter bestimmt. Dies erfordert eine Verknüpfung zwischen der Bauteilgestaltung und der Prozessparameterplanung, um einerseits die Herstellbarkeit von bestimmten Geometrien zu gewährleisten [Kim18]. Andererseits stehen dem Produktentwickler hierdurch neben den material- und geometriespezifischen Entwurfsvariablen zusätzliche prozessseitige Stellhebel zur Verfügung, um lokal gezielt Bauteileigenschaften zu variieren. Diese prozessseitigen Möglichkeiten werden allerdings primär in Bezug auf die Gewährleistung der Herstellbarkeit in Form von verfahrens- und prozessspezifischen Gestaltungsregeln betrachtet und somit nicht bereits mit in die Bauteilkonzeption einbezogen. Im Kontext der MMAM nehmen neben der Bereitstellung spezifischer Konstruktionsprinzipien für die Bauteilkonzeption und die Generierung von Lösungskonzepten auch die Schichtverbundgestaltung und -prüfung eine wesentliche Rolle ein, da die Materialkompatibilität eine notwendige Voraussetzung für die Realisierung von Bauteilen in Multi-Material-Bauweise darstellt. Verfügbare allgemeine Vorgehensmodelle im Forschungsfeld des DfAM [Kum16; Kum18], spezifische Rahmenwerke für die MMAM [Yao18b] oder verfügbare Standards mit Konstruktionsempfehlungen [DIN16b; DIN18c] betrachten die Schichtverbundgestaltung und -prüfung allerdings nicht.

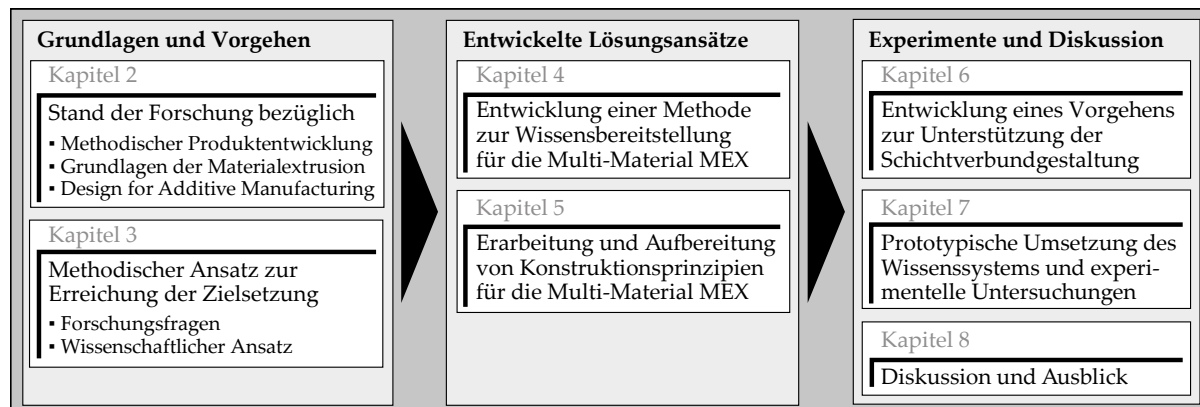
### 1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Aufbauend auf die beschriebene Problemstellung ist das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung einer Konstruktionsmethodik, welche die systematische Konzeption und Konstruktion additiv gefertigter Multi-Material-Bauweisen unter Berücksichtigung der Schichtverbundgestaltung speziell für das Verfahren der Materialeextrusion unterstützt. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Ableitung und Erarbeitung spezifischer Konstruktionsprinzipien zur Funktionsintegration mittels Multi-Material-Materialeextrusion (MMM) sowie auf deren strukturierter Bereitstellung, sodass eine zielgerichtete Berücksichtigung dieser neuen Freiheiten in der Produktentwicklung erleichtert wird. Anhand der Zielsetzung leiten sich folgende Forschungsfragen ab:

1. Welche konstruktiven Möglichkeiten bietet die additive Fertigung von Multi-Material-Bauweisen mittels Materialeextrusion?
2. Welches Wissen ist erforderlich, um die Bauteilkonzeption und Generierung von prinzipiellen Lösungen bzw. Lösungskonzepten für die Multi-Material-Materialeextrusion zu unterstützen?
3. Wie kann dem Produktentwickler dieses Wissen bereitgestellt werden, um eine systematische Berücksichtigung der Potenziale der Multi-Material-Materialeextrusion zu erleichtern?

Abbildung 1.1 zeigt das Vorgehen in dieser Arbeit, welches zur Beantwortung der Forschungsfragen angewendet wird. Zur Einordnung der Arbeit in den Stand der Forschung werden in Kapitel 2 zunächst die Grundlagen in Bezug auf die methodische Produktentwicklung vorgestellt. Anschließend folgt eine Beschreibung der Grundlagen der additiven Fertigung, wobei der Fokus auf dem Verfahren der Materialeextrusion liegt. Im Rahmen der MMM werden die relevanten Adhäsionstheorien beschrieben, zudem wird auf die verfahrensspezifischen Potenziale und Restriktionen sowie verfügbare Materialien eingegangen. Abschließend werden bestehende Ansätze im Forschungsfeld des DfAM vorgestellt, die primär die Bauteilkonzeption und die Wissensbereitstellung unterstützen. Auf dieser Basis wird der Forschungsbedarf in Bezug auf die Zielsetzung dieser

Arbeit konkretisiert: die methodische Unterstützung bei der systematischen Berücksichtigung der Gestaltungsfreiheiten der MMM hinsichtlich Funktionsintegration.



**Abbildung 1.1:** Aufbau der Arbeit

In Kapitel 3 schließt sich, aufbauend auf der Konkretisierung des Forschungsbedarfs in Form von Forschungsfragen, die Beschreibung des gewählten wissenschaftlichen Ansatzes zur Beantwortung dieser Forschungsfragen an. Hieraus leiten sich das Vorgehen und die Entwicklung sowie die Realisierung von Lösungsansätzen ab, welche in den Kapiteln 4, 5 und 6 dargestellt sind. Zunächst wird die Entwicklung einer Methode zur Unterstützung der Bauteilkonzeption unter Berücksichtigung der konstruktiven Potenziale der Multi-Material-Materialextusion durch eine systematische Wissensbereitstellung beschrieben. Neben den Anforderungen an die spezifische Wissensbereitstellung wird in Kapitel 4 der generelle Aufbau des Wissenssystems dargestellt, welcher als Basis für die Erarbeitung von konkreten Inhalten und die Umsetzung als Graphendatenbank dient.

Zur Analyse des Potenzials der Gestaltungsmöglichkeiten der Multi-Material MEX werden in Kapitel 5 Konstruktionsprinzipien erarbeitet. Hierbei werden unterschiedliche Ansätze verfolgt. Auf der einen Seite werden bereits realisierte Bauteile und Demonstratoren analysiert, welche mittels MMM gefertigt sind, um hieraus Möglichkeiten zur Funktionsintegration abzuleiten und zu systematisieren. Zudem werden die inhärenten Möglichkeiten der MEX hinsichtlich potenzieller Materialkombinationen auf Basis verfügbarer Materialien und den damit verbundenen Eigenschaften untersucht. Neben der Bereitstellung von Konstruktionsprinzipien wird zudem ein Ansatz für eine Verknüpfung mit opportunistischem und restriktivem Wissen entwickelt, um eine Konkretisierung der auf Basis der Prinzipien entwickelten prinzipiellen Lösungen unter Berücksichtigung verfahrensspezifischer Potenziale und Grenzen zu ermöglichen und die Anwendbarkeit zu erleichtern. Die Anwendung des entwickelten Vorgehens und der Inhalte bzw. Informationen zur Unterstützung der Bauteilkonzeption in Bezug auf eine gezielte Nutzung AM-spezifischer konstruktiver Freiheiten anhand von Workshops im akademischen und industriellen Kontext validiert.

Da der Materialkompatibilität zur Anwendung der Konstruktionsprinzipien eine entscheidende Rolle zukommt, werden in Kapitel 6 Prüfkörper entwickelt, um die Schichtverbundhaftung zu charakterisieren. Anhand ausgewählter Materialkombinationen werden Einflussfaktoren auf die Schichtverbundgestaltung identifiziert und entsprechende Regeln abgeleitet, die eine Berücksichtigung der Schichtverbundgestaltung in der Bauteilkonzeption ermöglichen. Zudem werden unterschiedliche Maßnahmen zur Verbesserung der Schichtverbundhaftung exemplarisch aufgezeigt.

In Kapitel 7 werden zunächst spezifische Kennwerte für ausgewählte Konstruktionsprinzipien anhand experimenteller Untersuchungen abgeleitet, was am Beispiel additiv gefertigter integrierter

Dämpfungsstrukturen sowie der Integration elektrisch leitfähiger und wärmeabstrahlender Strukturen exemplarisch gezeigt wird. Anschließend wird die prototypische Umsetzung des entwickelten Wissenssystems als Graphendatenbank dargestellt. Deren Anwendbarkeit wird exemplarisch anhand von der Neukonzeption und additiven Fertigung einer Handprothese demonstriert. Abschließend wird in Kapitel 8 die Arbeit mit Bezug auf die Beantwortung der Forschungsfragen zusammengefasst und diskutiert. Hierauf aufbauend wird ein Ausblick auf weiterführende Forschungsarbeiten gegeben.





## 2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN UND STAND DER FORSCHUNG

In diesem Kapitel werden der Stand der Forschung in Bezug auf die methodische Produktentwicklung (Abschnitt 2.1), die Grundlagen der additiven Fertigung (Abschnitt 2.2) und das Methodische Konstruieren im Kontext der additiven Fertigung (Abschnitt 2.3) beschrieben. Der Fokus dieser Arbeit im Bereich der additiven Fertigungsverfahren liegt auf der Materialextrusion, sodass die weiteren verfügbaren Technologien nicht explizit betrachtet werden. Auf Basis der Ergebnisse wird abschließend der Forschungsbedarf konkretisiert, welcher als Grundlage für die Ableitung der Forschungsfragen und der Entwicklung des wissenschaftlichen Ansatzes in Kapitel 3 dient.

### 2.1 Methodische Produktentwicklung

Für die Erarbeitung einer Konstruktionsmethodik zum wissensbasierten Konstruieren für die Multi-Material-Materialextrusion werden in diesem Abschnitt die Grundlagen in Bezug auf die methodische Produktentwicklung beschrieben, wobei speziell auf etablierte Vorgehensmodelle (Abschnitt 2.1.2) und die Produktarchitekturgestaltung (Abschnitt 2.1.3) sowie die Wissensbereitstellung im Hinblick auf Konstruktionsprinzipien und das Design for X (Abschnitt 2.1.4 und Abschnitt 2.1.5) eingegangen wird.

#### 2.1.1 Einführung

Aufgrund sich stetig verkürzender Produktlebenszyklen stellt die Entwicklung neuer, innovativer Produkte eine zentrale Aufgabe für Unternehmen dar. In der Zielerreichung kommt einer systematischen Unterstützung des Produktentwicklers eine entscheidende Rolle zu. Diese Unterstützung kann durch ein definiertes Vorgehen sowie einen strukturierten Methodeneinsatz erfolgen [Gra13; Pon11]. Obwohl durch das methodische Vorgehen zunächst ein Mehraufwand speziell in der Aufgabenklärung und Konzepterstellung entsteht, kann auf diese Weise nachträglichen Entwicklungsänderungen vorgebeugt werden [Lin16, 409; Tue16, 13]

Eine *Methode* beschreibt in diesem Kontext ein planmäßiges und regelbasiertes Vorgehen, welches innerhalb einer bestimmten Tätigkeitsabfolge die Erreichung eines spezifischen Ziels unterstützt [Lin09, 333; Pon11, 443; VDI18a, 5]. Zentrale Merkmale einer Methode stellen dabei der konkrete Nutzen, der Kontext der Nutzung und der Fokus auf eine bestimmte Aufgabenstellung dar [Ble09; Pon11]. *Werkzeuge/Hilfsmittel* unterstützen die Methodenanwendung und gestalten das Handeln bzw. die Zielerreichung effektiver sowie effizienter [Lin09, 337; Pon11, 458].

Die Abbildung von Produkteigenschaften erfolgt beim Entwickeln und Konstruieren durch phasenbezogene Modelle und produktspezifische Daten, die mit Hilfe von Methoden generiert werden [Fel13, 11 ff.]. Innerhalb der Produktentwicklung werden auf den unterschiedlichen Konkretisierungsebenen Produktmodelle eingesetzt, die bestimmte Informationen in abstrahierter Form repräsentieren und auf diese Weise u.a. das Verständnis der Problemstellung, die Ermittlung relevanter Produkteigenschaften oder die Spezifikation der Lösung unterstützen sollen [Ehr13; Pon11]. Neben der Kreativität und Intuition des Entwicklers stellt das verfügbare bzw. systematisch bereitgestellte Wissen einen Schlüsselfaktor in der Produktentwicklung dar, um einerseits Lösungsideen zu kreieren und Lösungskonzepte zu entwickeln sowie andererseits fundierte Entscheidungen treffen zu können [Fu15; Tom09].

Unter dem Begriff *Design Theory and Methodology* (DTM) werden unterschiedliche Forschungsansätze im Kontext der allgemeinen Konstruktionsmethodik in Bezug auf Vorgehensmodelle bzw.

Entwicklungsmethodiken, Methoden und Werkzeuge zusammengefasst. Die entwickelten methodischen Ansätze werden hinsichtlich der Kriterien allgemein und spezifisch sowie abstrakt und konkret differenziert [Tom09].

Nachfolgend werden zunächst allgemeine Vorgehensmodelle in der Produktentwicklung beschrieben (Abschnitt 2.1.2), bevor anschließend konkrete Ansätze in Bezug auf die Produktarchitekturgestaltung (Abschnitt 2.1.3), Konstruktionsprinzipien (Abschnitt 2.1.4) und die Wissensbereitstellung in der Produktentwicklung (Abschnitt 2.1.5) erläutert werden.

### 2.1.2 Phasen der Produktentwicklung

Der Prozess der Produktentwicklung beschreibt nach VDI 2221 (Blatt 1) einen „interdisziplinären Unternehmensprozess zur Entwicklung eines marktfähigen Produkts, basierend auf der Definition initialer Ziele und Anforderungen an das Produkt, welche im Lauf des Prozesses kontinuierlich weiterentwickelt und iterativ angepasst werden“ [VDI18a, 5]. Zum strukturierten Vorgehen innerhalb des Produktentwicklungsprozesses (PEP) existieren unterschiedliche Entwicklungsansätze, wobei der Problemlösung ein grundsätzliches Vorgehen in der Lösungssuche zugrunde liegt. Diese besteht im Allgemeinen aus den Schritten der Aufgabenklärung sowie der Lösungssuche und -auswahl, wobei eine Dekomposition des Problems in lösbare Einzelprobleme erforderlich ist und Iterationen innerhalb der sequentiellen Abfolge der Schritte zulässig sind [Ehr13, 103 ff.; Lin16, 410 f.; Pah07, 191; VDI18a, 9 f.]. Entwicklungsmethodiken zielen generell auf die Unterstützung der Tätigkeiten des Entwickelns, Entwerfens und Konstruierens von Produkten auf Basis eines strukturierten und methodischen Vorgehens ab [Lin16, 408], wobei dieser Prozess sowohl logische als auch kreative Aspekte beinhaltet [Goe89]. Aufgrund der Komplexität heutiger Produkte sind spezifische Vorgehensstrategien notwendig, die in der Generierung von Lösungskonzepten u.a. Abstraktionsschritte zur Loslösung von bekannten Lösungsansätzen beinhalten. Aus diesem Grund beinhalten Entwicklungsmethodiken unterschiedliche, logisch verknüpfte Aktivitäten, welche in spezifischen Zwischenergebnissen resultieren und entweder sequenziell, zyklisch, phasenweise wiederholend oder phasenweise konkretisierend durchlaufen werden können [Lin16, 410 ff.].

In der Produktentwicklung im akademischen und industriellen Kontext weit verbreitet ist die Entwicklungsmethodik nach VDI-Richtlinie 2221 [VDI93; VDI18a; VDI18b], wobei aufgrund des sehr allgemeinen und unspezifischen Charakters des generischen Vorgehens die Anwendung in der Industrie limitiert und daher nicht unumstritten ist [Tom09], da eine Vielzahl der Produktentwicklungsaufgaben im industriellen Umfeld Variantenkonstruktionen umfassen, in denen die Schritte des Konzipierens und Entwerfens eine stark untergeordnete Rolle spielen [Ehr13, 271]. Die Entwicklungsmethodik nach VDI 2221 [VDI18a] fokussiert in der überarbeiteten Fassung im Kern der Produktentwicklung acht Aktivitäten. Der PEP ordnet sich weiterhin in die Produktentstehung sowie den übergeordneten Produktlebenszyklus ein, wobei hierin neben der Produktplanung u.a. auch die Nutzung und Außerbetriebnahme umfasst werden [Lin16; VDI18a]. Die Aktivitäten des PEP beinhalten folgende Schritte und Arbeitsergebnisse [Lin16, 414; VDI18a]:

1. Klären und Präzisieren des Problems bzw. der Aufgabe: In diesem Arbeitsschritt werden alle verfügbaren Informationen zum Produktkontext gesammelt, strukturiert und deren Vollständigkeit geprüft. Zudem wird eine Präzisierung des zu lösenden Problems durchgeführt, um die anschließende Lösungssuche zu erleichtern. Das Ergebnis bilden Anforderungen, die in Form einer Anforderungsliste oder eines Lasten- bzw. Pflichtenhefts aufbereitet werden können. Diese werden während der Produktentwicklung stetig verfeinert und fortlaufend ergänzt [Lin16, 414; VDI18a].

2. Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen: Der zweite Schritt stellt eine zentrale Aktivität im PEP, v.a. im Kontext von Neuentwicklungen oder grundsätzlichen Problemlösungen, dar, da die bewusste Abstraktion und das funktionsorientierte Vorgehen eine Erweiterung des Lösungsraums und somit die Suche nach alternativen Lösungsprinzipien forciert. Die Gesamtfunktion wird dabei in einzelne Teilfunktionen zerlegt, um diese zu ordnen und Beziehungen zwischen ihnen zu verdeutlichen. Dieser Schritt resultiert in Funktionsmodellen, welche eine funktionsorientierte Sicht auf die Zusammenhänge bieten und in unterschiedlichen Repräsentationsformen (z.B. Funktionsstruktur und Funktionsbäume [Pon11; Sto99]) vorliegen können. [Lin16, 414; VDI18a]
3. Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen: Basierend auf den erzeugten Funktionsmodellen erfolgt das Suchen nach Lösungsprinzipien für die wesentlichen Teilfunktionen. Das Lösungsprinzip beschreibt dabei die grundsätzliche Realisierung einer oder mehrerer Funktionen durch Effekte oder Wirkprinzipien [VDI18a]. Die prinzipiellen Lösungen basieren folglich auf der Auswahl natürlicher Effekte und der Verknüpfung mit sogenannten wirkstrukturellen Festlegungen (Wirkprinzipien), welche anschließend zu Wirkstrukturen zusammengeführt werden. Als Ergebnis liegen prinzipielle Lösungskonzepte vor, die bspw. als verbale Formulierungen in Form von Skizzen oder als Modelle vorliegen können. Dieser Schritt wird in der Regel durch strukturierte Lösungssammlungen unterstützt [Rot01; VDI82]. [Lin16, 414; VDI18a]
4. Bewerten und Auswählen von Lösungskonzepten: In Schritt vier werden die generierten prinzipiellen Lösungen im Hinblick auf die Erfüllung der Anforderungen überprüft und eine Auswahl (z.B. Paarweiser Vergleich oder ABC-Analyse [Lin09]) der vielversprechendsten Konzepte auf Basis geeigneter Bewertungskriterien sowie einer Gewichtung getroffen. Das Ergebnis dieses Schritts sind definierte Lösungskonzepte für die einzelnen Teilfunktionen. [Lin16, 414; VDI18a]
5. Gliedern in Module, Schnittstellendefinition: Basierend auf der Auswahl von Lösungskonzepten wird die Systemarchitektur durch eine Aufteilung in Module festgelegt. Die System- bzw. Produktarchitektur stellt eine Weiterentwicklung der zuvor erarbeiteten Funktions- und Wirkstruktur dar und bildet die Grundlage für eine disziplinspezifische und -übergreifende Entwicklungsarbeit. Sie wird bspw. in Anordnungsskizzen oder Graphen repräsentiert. [Lin16, 414; VDI18a]
6. Gestalten der Module: In diesem Teilschritt wird ein essentieller Konkretisierungssprung erreicht, indem eine Grobgestaltung der einzelnen Module in Form von Vorentwürfen erfolgt. Als Ergebnisse liegen z.B. maßstäbliche Zeichnungen oder CAD-Modelle vor. [Lin16, 414; VDI18a]
7. Integrieren des gesamten Produkts: Erst in diesem Schritt werden die einzelnen Module verknüpft und weitere Detailangaben festgelegt. Im resultierenden Gesamtentwurf sind alle wesentlichen gestalterischen Festlegungen enthalten, auf dessen Basis die Produktrealisierung erfolgen kann. In der Regel wird der Gesamtentwurf durch technische Zeichnungen, CAD-Modelle und Stücklisten abgebildet. [Lin16, 414; VDI18a]
8. Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben: Im letzten Schritt erfolgt, basierend auf der Ausarbeitung der Herstellungs-, Nutzungs- und Zertifizierungsangaben (Produktdokumentation), die Realisierung bzw. Fertigung des Produkts. Somit bildet diese Aktivität den Abschluss des PEP. [Lin16, 414; VDI18a]

*Absichern der Anforderungserfüllung:* Eine übergeordnete und während der einzelnen Aktivitäten der Produktentwicklung kontinuierlich durchgeführte Tätigkeit bildet die Analyse des Abgleichs zwischen Ergebnissen und Zielen bzw. Anforderungen. Als Hilfsmittel werden zur Verifikation und Validierung bspw. Simulationen und Berechnungen sowie experimentelle Versuche und Tests eingesetzt. Die Validierung beschreibt dabei die Eignung des Produkts für den jeweiligen Einsatzzweck, wohingegen die Verifikation die Übereinstimmung der Realisierung mit den Anforderungen in der Spezifikation prüft. [Lin16, 414; VDI18a]

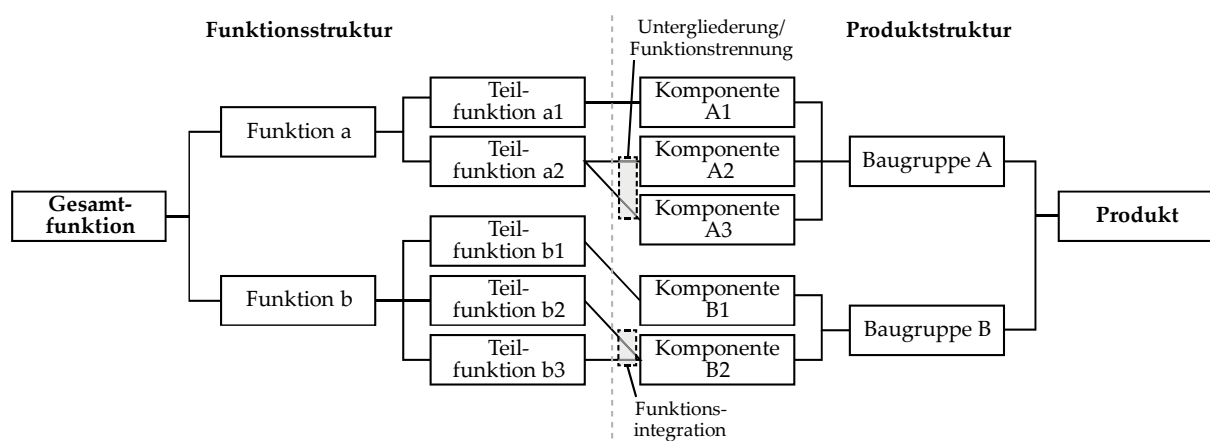
Die Einteilung der sequenziellen Arbeitsschritte erfolgt in den Phasen Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten, wobei ein Pendeln zwischen den einzelnen Aktivitäten innerhalb der Bearbeitungszeit die Regel in der Praxis darstellt [VDI18a]. Wie bereits erwähnt, werden je nach Entwicklungskontext und Art der Konstruktion bzw. Entwicklungsaufgabe nicht alle Phasen und Aktivitäten durchlaufen [Ehr13, 271; VDI97]. Der PEP nach VDI2221 (Blatt 1) bildet aufgrund seines generischen Charakters und den enthaltenen Musterelementen in Form von Aktivitäten eine Vorlage für die Gestaltung anwendungsbezogener und spezifischer Entwicklungsprozesse. Durch die eine Zusammenführung von relevanten Kontextfaktoren und Prozesswissen (z.B. Referenzprozesse oder Projektpläne) lassen sich auf Basis der Entwicklungsmethodik die erforderlichen Schritte innerhalb der Produktentwicklung und des Entwicklungskontexts definieren und somit auf die Entwicklungsaufgabe anpassen [VDI18b]. Neben dem Vorgehensmodell nach VDI-Richtlinie 2221 haben sich weitere ähnlich sequentielle Abläufe in der methodischen Produktentwicklung etabliert wie das „Braunschweiger Modell“ [Rot94] oder netzwerkartig aufgebaute Abläufe wie das Münchener Vorgehensmodell [Lin09, 47], das den iterativen Ablauf von Produktentwicklungsprozessen in den Vordergrund stellt. Zudem existieren disziplinspezifische Entwicklungsmethodiken wie das V-Modell für mechatronische Systeme, welches das Zusammenwirken aus Maschinenbau, Informationstechnologie und Elektrotechnik betrachtet und speziell die Eigenschaftsabsicherung zwischen dem Systementwurf und der Systemintegration berücksichtigt [VDI04].

Im Subprozess des Konzipierens stellt die Abstraktion durch das Aufstellen von Funktionsstrukturen die Basis zum Erkennen der wesentlichen Problemstellung sowie der Lösungsfindung dar und bildet somit den Ausgangspunkt für das Suchen nach Wirkprinzipien und deren Kombination zu Wirkstrukturen. Durch den Schritt der abstrahierten, lösungsneutralen Problembeschreibung wird dabei einer Vorfixierung auf eine spezifische Lösung vorgebeugt. Dies schafft die Grundlage für die Anwendung spezifischer Kreativmethoden zur Umgehung von Denkbarrieren sowie der Generierung prinzipieller Lösungen und der Lösungsraumerweiterung [Jan91; Lin16, 411 ff., 743 ff.; Pah07, 127 f., 232; Rot00; VDI18a, 8 ff.]. Die Funktionsmodellierung und Dekomposition der Problemstellung, d.h. die Zergliederung der Gesamtfunktion in Teilfunktionen, wird in diesem Kontext innerhalb der Produktentwicklung als essentieller Schritt für die Kreativitätsentwicklung und der Anwendung von Konstruktionsprinzipien gesehen. Zudem bildet sie eine Entscheidungsgrundlage für die Produktarchitekturgestaltung und die Suche nach Teillösungen, z.B. im Hinblick auf integrierende oder differenzierende Produktstrukturen [Fel13, 291; Sto99; Val18].

Aufgrund der neuen konstruktiven Freiheiten der additiven Fertigung stehen dem Produktentwickler bzw. Konstrukteur neue Möglichkeiten in der Produktgestaltung zur Verfügung, sodass die Schritte des Konzipierens und Entwerfens eine zentrale Rolle in der Anpassung bestehender sowie der Entwicklung neuer Produkte spielen. Wichtige Elemente bilden in diesem Zusammenhang die Funktionsmodellierung und Systemarchitektur sowie die Wissensbereitstellung im Hinblick auf die Identifikation spezifischer Lösungsprinzipien und Gestaltungsgrenzen. Diese Schritte werden nachfolgend in den Abschnitten 2.1.3 und 2.1.4 erläutert.

### 2.1.3 Produktarchitekturgestaltung

Die Produktarchitektur bildet durch eine Definition von Beziehungen den Zusammenhang zwischen der Funktions- und Produktstruktur, also der funktionalen und physikalischen Produktbeschreibung [Fel13, 257 ff.; Lin16, 101; Ulr95]. In ihr finden sich die zentralen Ergebnisse und Entscheidungen der Konzeptphase (prinzipielle Lösungen) sowie die entworfenen Komponenten (Vorentwürfe) wieder, welche den einzelnen Teilfunktionen zugeordnet werden, sodass die Produktarchitektur eine zentrale Rolle innerhalb der Produktentwicklung einnimmt [Lin16, 101]. In der Produktstruktur werden die Beziehungen zwischen den Einzelteilen und Baugruppen abgebildet, wobei die Festlegung nach spezifischen Gesichtspunkten (z.B. Fertigung oder Montage) erfolgt [Jes97]. Somit erfolgt durch die Produktarchitektur bereits frühzeitig im PEP eine grundsätzliche Festlegung eines Großteils der Produkteigenschaften [Lin16, 99]. Die Eigenschaften technischer Systeme lassen sich in Zustands-, Wirk- und Verhaltenseigenschaften gliedern. Letztere betrachten dabei die Wechselwirkungen des Systems mit der Umwelt, wohingegen die Wirkeigenschaften den funktionalen Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen beschreiben. Die Zustandseigenschaften bilden die Beschaffenheit des Systems ab und umfassen somit die durch den Produktentwickler unmittelbar beeinflussbaren Merkmale wie geometrische, mechanische oder stofflich-energetische Eigenschaften [Ink16, 17 f.]. Abbildung 2.1 zeigt die schematische Darstellung der Produktarchitektur mit den Beziehungen zwischen der Funktions- und Produktstruktur. Die Zuordnung von Teilfunktionen zu Komponenten kann dabei je nach verwendetem Konstruktionsprinzip und Produktanforderungen unterschiedlich erfolgen. Neben einer Eins-zu-Eins-Zuordnung sind auch die Aufteilung einer Teilfunktion auf mehrere Komponenten (Funktionstrennung) sowie die Erfüllung mehrerer Teilfunktionen durch eine Komponente (Funktionsintegration) möglich. In Abhängigkeit zu der Aktivität innerhalb des PEP sowie der entsprechenden Analyse- oder Synthesetätigkeit kann der Detaillierungsgrad des verwendeten Produktmodells bzw. der Repräsentationsform variieren, sodass auf dessen Basis die Anwendbarkeit spezifischer Methoden erleichtert wird [Fel13, 251 ff.; Ric16; Ric17]. Den Ausgangspunkt für die Anwendung einer Vielzahl von Methoden bildet die funktionale Produktrepräsentation, wobei der Lösungsraum bei der Produktarchitekturgestaltung maßgeblich in Abhängigkeit bekannter bzw. nutzbarer Technologien und deren Restriktionen bestimmt wird [Ric16].



**Abbildung 2.1:** Schematische Darstellung der Produktarchitektur mit den Beziehungen zwischen der funktionalen und physischen Beschreibung des Produktes (angelehnt an [Fel13, 258 f.])

Die Produktarchitekturgestaltung erfolgt unter Betrachtung des Gesamtsystems und nach unterschiedlichen Zielstellungen wie dem resultierenden Kundennutzen oder zentralen Unternehmens-

prozessen wie Entwicklung, Produktion oder Logistik, wobei das vorrangige Ziel der Produktstrukturierung in der Ermittlung des bestmöglichen Kompromisses zwischen Integration und Modularisierung sowie Standardisierung und Differenzierung besteht [Gro09, 28 ff.; Ric16]. Die resultierenden Bauweisen entstehen durch die Anwendung unterschiedlicher Konstruktionsprinzipien und können nach dem Grad der funktionalen und physischen Unabhängigkeit u.a. in modulare (funktional und physisch unabhängig) und integrale Produktarchitekturen (funktional und physisch abhängig) unterschieden werden [Fel13, 862]. *Integrale Produktstrukturen* weisen in der Regel reduzierten Materialaufwand bzw. Gewicht, gesteigerte Robustheit, minimale Teileanzahl sowie geringe Einzelkosten auf und bieten dem Konstrukteur im Allgemeinen eine hohe Gestaltungsfreiheit. Dem gegenüber stehen im Vergleich zu *modularen* bzw. *differentialen Bauweisen* der deutlich gesteigerte Aufwand für Produktweiterentwicklungen oder -derivaten sowie ein hoher Wartungsaufwand [Gro09, 37; Zie12]. Konstruktionsprinzipien zur Realisierung von Integralbauweisen durch das Zusammenfassen von Bauteilen bzw. Wirkflächen und -körpern sind z.B. die *Strategie der einteiligen Maschine* [Ehr85] oder das *Systematische Vorgehen bei der Funktionsintegration* [Rot00]. Neben der Integralbauweise, welche primär auf die Reduzierung der Teileanzahl abzielt, hat sich das Konstruktionsprinzip der *Multifunktionalbauweise* etabliert, das eine Erhöhung der genutzten Funktionen durch eine Komponente oder ein Bauteil mittels Nutzung bestehender geometrischer oder stofflicher Eigenschaften fokussiert [Kol94, 270 ff.]. Zudem werden *Verbund-* bzw. *Multi-Material-Bauweisen* unterschieden, welche eine verfahrensbedingte Kombination unterschiedlicher Werkstoffe innerhalb eines Bauteils erlauben, um so eine Gewichts- und Teileanzahlreduzierung durch Funktionsintegration oder eine Funktionserweiterung zu erreichen. Je nach Heterogenität der Werkstoffkombination können unterschiedliche Stufen von MMB unterschieden werden [Kle17a]. Die in dieser Arbeit betrachteten Materialkombination beschränken sich auf unterschiedliche thermoplastische Kunststoffe und Komposite.

#### 2.1.4 Konstruktionsprinzipien und Design for X

In der Generierung von alternativen prinzipiellen Lösungen bzw. Lösungskonzepten hebt Buur (1990) die Bedeutung der Wissensbereitstellung in Form von Konstruktionsprinzipien (engl. design principles) in der Produktentwicklung als allgemeine Regeln zur Unterstützung der Entwicklungstätigkeit geeigneter Lösungen hervor [Buu90]. Konstruktionsprinzipien besitzen somit einen spezifischeren Charakter als Methoden und adressieren primär eine Erhöhung der Chancen für eine erfolgreiche Produktentwicklung bzw. -gestaltung [Per18, 81].

Fu et al. (2016) definiert *Konstruktionsprinzipien* als eine grundlegende Regel oder Gesetzmäßigkeit, die auf Erfahrungen bzw. empirischen Belegen basieren und durch Führung innerhalb des gesamten Produktentwicklungsprozesses die Chancen auf erfolgreiche Lösungen erhöhen [Fu16]. Diese Definition ist demnach weitestgehend mit der Definition des *Lösungsprinzips* gleichzusetzen, welches die „grundsätzliche Umsetzung einer Funktion oder mehrerer verknüpfter Funktionen durch Auswahl von Effekten oder Wirkprinzipien“ beschreibt [VDI18a, 4], wobei als *Wirkprinzip* die „Einbeziehung des eingesetzten physikalischen Effekts sowie geometrischer und stofflicher Merkmale (Wirkgeometrie, Wirkbewegung und Werkstoff)“ gesehen wird [VDI18a, 6; Pah07, 53]. Es besteht somit keine unmittelbare Bindung an eine spezifische Konstruktionsaufgabe [VDI97]. Prinzipien werden zudem für die Entwicklung unterstützender Methoden und Hilfsmittel eingesetzt und umfassen folgende Aspekte [Fu16; Per18, 82 f.]:

- das Gestaltungsziel (engl. design objective),
- eine Verknüpfung zum Kontext in Bezug auf die Anwendung (engl. design context),

- Empfehlungen zur Umsetzbarkeit bzw. Realisierung (engl. actionable recommendations),
- Informationen bezüglich des Nutzens (engl. value proposition) bzw. der adressierten Konstruktionsziele (engl. design goals) des Prinzips.

Im Vergleich zu Prinzipien werden Heuristiken und Richtlinien (engl. guidelines) differenziert, wobei eine scharfe Trennung schwierig ist [Fu16]. *Heuristiken* basieren meist auf Erfahrungen oder experimentellem Verständnis und geben eine Richtung zur Problemlösung vor, um die Erreichung einer zufriedenstellenden Lösung zu unterstützen [Fu16; VDI18a]. Richtlinien sind im Vergleich zu Prinzipien kontextabhängiger und weniger grundlegend und im Vergleich zu Heuristiken präskriptiver anzusehen [Fu16]. Eine etablierte Methode zur Ableitung von Prinzipien, Heuristiken und Richtlinien ist die Analyse bestehender Produkte im Hinblick auf die Realisierung von Schlüsselfunktionen und deren anschließende Verallgemeinerung [Fu16; Yil10].

Zur Unterstützung des Produktentwicklers innerhalb des PEP existieren unterschiedliche Arten von (Konstruktions-)Prinzipien abhängig von ihren Zweckbestimmungen für unterschiedliche Konstruktionsabschnitte und Aktivitäten, die bspw. in Form von Katalogsystemen strukturiert werden können. Es werden folgende Katalogarten unterschieden [Rot01, 9 ff.; VDI82]:

- *aufgabenunabhängige Objektkataloge* (z.B. Werkstoffeigenschaften, physikalische Effekte),
- *aufgabenabhängige Lösungskataloge* (z.B. Kraft erzeugen, Nachricht verknüpfen),
- *Operationskataloge* (z.B. Konstruktionsregeln oder zur Erzeugung von Funktionsstrukturen),
- *Beziehungskataloge* (z.B. Welle-Nabe-Verbindungen oder Rohrverbindungen).

In Abhängigkeit von der Beschreibungsform der Prinzipien hinsichtlich des Detail- bzw. Abstraktionsgrads variieren der Bereich und die Einfachheit der Anwendbarkeit, sodass je nach Konstruktionszweck eine zentrale Herausforderung in der Identifikation eines geeigneten Detailgrads besteht, welcher eine möglichst breite wie auch einfache Anwendung des Prinzips ermöglicht [VW02, 67; Ink16, 74]. In der Literatur finden sich unterschiedliche Prinzipiensammlungen, die u.a. allgemeine Prinzipien zum erfinderischen Problemlösen zum Überwinden von Widersprüchen (TRIZ) [Alt84], kontextabhängige Heuristiken [Yil10], Methoden- und Lösungssammlungen für die Funktionsintegration [Zie12], Lösungsprinzipien zur Entwicklung adaptiver Systeme [Ink16] sowie technologiespezifische Prinzipien für die additive Fertigung [Blo17; Blo19; Wei16] oder das Mehrkomponenten-Spritzgießen [Ink17; Kle16; Kle17b] umfassen.

Zudem existieren in der Produktentwicklung eine Vielzahl an Gestaltungsrichtlinien und Konstruktionsprinzipien, welche unter den Begriffen *Design for X* (DFX) bzw. *Design to X* (DTX) zusammengefasst werden. Das „X“ steht dabei für spezifische Produkteigenschaften wie Kosten oder Gewicht (Prinzipien des DTX) oder bestimmte Aktivitäten und Folgeprozesse innerhalb des PEP wie die Montage (DFX-Prinzipien). Das DFX und DTX umfassen demnach alle Methoden und Hilfsmittel, welche den Konstrukteur bzw. Produktentwickler in der Berücksichtigung spezifischer Aspekte und Einflüsse der einzelnen Phasen der Produktentstehung innerhalb der Produktentwicklung unterstützen. Eine Strukturierung der unterschiedlichen Ansätze ist sowohl prozessorientiert als auch hierarchisch möglich [Ehr13, 353 ff.; Jan91; Pon11, 181; Rie12, 445 ff.; Rie18, 465 ff.; Tom09; VDI18a, 22 f.]. Traditionelle Aspekte des DFX innerhalb der unterschiedlichen Ansätze sind u.a. das Fertigungsgerechte Konstruieren (Design for Manufacturing, DFM) und die Montagegerechte Gestaltung (Design for Assembly, DFA), da die Fertigung sowie Montage große Kostentreiber darstellen und dadurch mit dem Kostengerechten Entwickeln wechselwirken

[Pon11, 29; Tom09]. Die große Bedeutung dieser Ansätze resultiert hierbei u.a. aus den Wechselwirkungen bzw. dem erforderlichen Dialog zwischen der Konstruktion und Fertigung, da die bereits in den frühen Phasen des PEP getroffenen Entscheidungen die finalen Produktkosten maßgeblich bestimmen [Rie18, 468 f.; Ehr14, 13; Tom09]. Das DFM und DFA werden daher auch unter dem Begriff des DFMA (Design for Manufacturing and Assembly) zusammengefasst [Ben19; Boo11; Gib15, 401 ff.].

Zur Unterstützung der Umsetzung und Berücksichtigung spezifischer Ziele in der Produktgestaltung haben sich sowohl allgemeine Grundsätze und generelle Prinzipien als auch spezifische Regeln, die z.B. in Katalogform aufbereitet sind, durchgesetzt [Pon11, 30]. Weitere Ansätze im Kontext des DFX zielen aufgrund von dessen Komplexität auf die Erforschung softwarebasierter Assistenzsysteme mit einer gut strukturierten Wissensbasis ab. Diese beinhaltet einen informationserzeugenden Syntheseteil sowie einen informationsverarbeitenden Analyseteil, verknüpft mit unterschiedlichen Werkzeugen bzw. Tools zur Berücksichtigung der verschiedenen Zielstellungen des DFX [Rie12, 457 ff.]. Neue Forschungsarbeiten ergänzen die klassischen Konstruktions-Assistenzsysteme zur Wissensbereitstellung um selbstlernende Aspekte im Sinne der Künstlichen bzw. Artifiziellen Intelligenz, die zur Akquise, Formalisierung und Strukturierung der Wissensbasis genutzt werden [Rie18, 478 ff.; War17].

### 2.1.5 Bereitstellung von Produktwissen

Eine systematische und strukturierte Bereitstellung von Produktwissen dient u.a. der Entlastung des Produktentwicklers bei der Durchführung von Routinetätigkeiten und der Risikominimierung durch Nutzung bewährter Lösungen sowie der Lösungsraumerweiterung durch Aufzeigen wenig bekannter Gestaltungsmöglichkeiten und der Wiederverwendung von Lösungen [And15, 145 ff.; Ink16, 74; Rot01, 1; Rie18, 472 ff.; VDI17, 6 ff., 22 ff.; Ver12]. *Wissen* bezeichnet in diesem Kontext vernetzte Informationen (strukturierte, kontextabhängige und strukturierte Daten bzw. objektive Fakten), die das Anstellen von Vergleichen und Verknüpfungen sowie das Treffen von Entscheidungen in der Lösung konstruktiver Problemstellungen ermöglichen [Pro12, 15 ff.; Tue16, 31; VDI09, 3 f.]. Das Wissensmanagement unterstützt mit den Kerntätigkeiten der Identifikation, Bewahrung, Nutzung, Verteilung, Entwicklung und dem Erwerb von Wissen das Überwinden von Denkblockaden und fördert die Kreativitäts- und Innovationsfähigkeit. Die Wissensintegration bildet dabei eine wesentliche Grundlage für Wettbewerbsvorteile [Gra13, 19 f.; Lin16, 249 ff.; Pro12, 30 ff.; VDI09, 9 ff.]. Die Repräsentationsart in der Wissensübertragung (z.B. Regeln, Anweisungen oder Bedingungen) variiert dabei in Abhängigkeit von der Anwendung. Regeln können u.a. durch eine Bezeichnung, durch die Zuordnung zu Zielen und einem Kontext, durch eine Beschreibung sowie Verbindungen zu Constraints oder Abbildungen und Herkunftsdaten repräsentiert werden [VDI17, 9 f., 24; Gra13, 20 f.].

Konstruktive Beziehungssysteme sind im Kontext der wissensbasierten Konstruktion als phasenübergreifendes Hilfsmittel anzusehen, da sie in der Bereitstellung von Sachwissen auf eine gesamthafte Darstellung der systematischen Verknüpfungen zwischen Anforderungen bzw. Randbedingungen und gestalterisch festzulegenden Lösungs- bzw. Konstruktionsparametern samt potenzieller Zielkonflikte abzielen [Fra76, 35; Tue16, 22, 84 f.]. Zur Speicherung und systematischen Bereitstellung von spezifischem Produktwissen haben sich als geeignetes Hilfsmittel hingegen Lösungssammlungen und Konstruktionskataloge etabliert [Rot01; VDI82]. Eine Weiterentwicklung von Konstruktionskatalogen zur multimedialen Bereitstellung von Konstruktionswissen für den



Syntheseprozess stellen webbasierte Hilfsmittel dar. Das bereitgestellte Wissen wird in Gestaltungswissen (z.B. hinsichtlich Fertigung und Montage) und allgemeines Wissen (bezüglich unterschiedlicher Technologien wie Fertigungs- oder Fügeverfahren) differenziert [Rie18, 477 f.]. Zur systematischen Bereitstellung von Gestaltungs- und Technologiewissen in der Produktentwicklung existieren unterschiedliche multimediale und webbasierte Systeme u.a. zum fertigungs- und montagegerechten Gestalten [War00; Rie18, 477], für die Auswahl additiver Fertigungsverfahren im Prototypenbau [Kir11] oder die Gestaltung additiv gefertigter Endprodukte [Weil18] sowie Lösungssammlungen und Gestaltungsregeln für Multi-Material-Bauweisen [Kle16].

## 2.2 Grundlagen der Materialextrusion

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen der additiven Fertigung in Bezug auf die Materialextrusion beschrieben. Zunächst wird eine allgemeine Einführung (Abschnitt 2.2.1) in die additive Fertigung gegeben und aktuelle Handlungsfelder sowie die Normungsaktivitäten näher beleuchtet. Das Verfahrensprinzip der Materialextrusion und verfügbare Materialien im Allgemeinen sowie die Grundlagen relevanter Adhäsionstheorien für die Multi-Material-Materialextrusion im Speziellen werden in Abschnitt 2.2.2 erläutert. Hieran anschließend wird in Abschnitt 2.2.3 auf verfahrensspezifische Potenziale und Grenzen der MEX eingegangen.

### 2.2.1 Einführung in die additive Fertigung

Die *additive Fertigung* bezeichnet eine Verfahrensgruppe, die „[...] durch Verbinden von Material Bauteile aus 3-D-Modelldaten, im Gegensatz zu subtraktiven und umformenden Fertigungsverfahren, üblicherweise Schicht für Schicht, herstellt“ [DIN18a, 6]. Durch das Schichtbauprinzip bedingt weisen additive im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren Besonderheiten auf, die u.a. darin bestehen, dass die Fertigung direkt anhand von 3-D-Daten und ohne zusätzliche Werkzeuge erfolgt und die mechanisch-technologischen Eigenschaften erst während des Fertigungsprozesses entstehen [Geb13, 4; Geb16, 3]. Die Prozesskette von der Erzeugung eines virtuellen 3-D-Volumenmodells bis hin zum physischen Bauteil ist allen additiven Verfahren im Grundsatz gleich. Sie umfasst folgende Schritte: Erstellung eines geschlossenen Volumenmodells, Positionierung des Modells im Bauraum, Erzeugung einer rechnerinternen Schnittdarstellung zur Erstellung der mathematischen Schichtinformationen, additive Fertigung durch verfahrensspezifische Erzeugung von Einzelquerschnitten und deren Zusammenführung zu Schichten in Bauebene und Baurichtung sowie verfahrensspezifische Schritte zur Nacharbeit [Geb16, 21 ff.].

Auf Technologieebene lassen sich die unterschiedlichen additiven Fertigungsverfahren übergeordnet nach dem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials klassifizieren und weiter nach dem Prinzip der Verfestigung bzw. des physikalischen Mechanismus der Schichtanbindung spezifizieren [Geb13, 92; Geb16, 94]. Das in dieser Arbeit betrachtete Verfahren der Materialextrusion lässt sich den Extrusionsverfahren zuordnen, bei denen das Ausgangsmaterial als Feststoff vorliegt und nach dem Prinzip des Aufschmelzens und Erstarrens linienförmig aufgetragen wird [VDI19]. Nach DIN EN ISO 52900 [DIN18a] lassen sich die AM-Technologien weiterhin in einstufige und mehrstufige Prozesse gliedern. Die MEX ist den einstufigen Prozessen zugeordnet, da direkt einsetzbare Bauteile erzeugt werden. Bei mehrstufigen Prozessen wird hingegen zunächst ein Grünling additiv hergestellt und anschließend mittels Sekundärprozess (z.B. Sintern oder Infiltration) zum einsetzbaren Bauteil konsolidiert.

Der breite Einsatz additiv gefertigter Bauteile in Bereichen abseits des Prototypenbaus ist u.a. auf Verbesserungen in Bezug auf die Anlagengenauigkeit und die mechanisch-technologischen Eigenschaften zurückzuführen [Cam12]. Die unterschiedlichen Anwendungsbereiche lassen sich in die Fertigung von Konzeptmodellen und Funktionsprototypen (engl. Rapid Prototyping), den additiven Werkzeugbau (engl. Rapid Tooling) und die direkte Herstellung von Endprodukten (engl. Rapid Manufacturing) gliedern [Geb16, 6 f.]. Der Anteil von Funktionsbauteilen macht mittlerweile den größten Anteil an additiv gefertigten Bauteilen aus [Woh18].

Typische Einsatzgebiete sind u.a. in den Bereichen der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie und der Medizintechnik die Fertigung von Einzelstücken, Kleinserien oder Ersatzteilen. Der Einsatz additiver Fertigungsverfahren ist vor allem dann lohnenswert, wenn Potenziale wie verkürzte Entwicklungszeiten aufgrund der digitalen Prozesskette und Werkzeugunabhängigkeit sowie konstruktive Aspekte zur Leistungssteigerung (z.B. Leichtbau), zur Senkung des Montageaufwands oder zur Individualisierung von Produkten im Fokus stehen [Bau16; Geb16; Woh18]. Hierbei heben Bauer et al. (2016) die Notwendigkeit der ganzheitlichen Betrachtung des Produktes hervor, um sowohl innovative als auch einen Mehrwert generierende Lösungen zu entwickeln. Neben material- und prozesstechnischen Fragestellungen wird zukünftiger Handlungsbedarf vor allem im Bereich der Befähigung von Produktentwicklern bzw. Konstrukteuren zur Sensibilisierung der neuen konstruktiven Freiheiten von AM im Hinblick auf die direkte Herstellung funktionsorientierter Endprodukte gesehen [Bau16]. Auch in der Entwicklung von Normen und Standards spiegelt sich dieser Wandel zunehmend wider, sodass verfahrensspezifische Gestaltungsmöglichkeiten und -regeln in Richtlinien [VDI15; VDI19] und internationalen Normen [DIN17a; DIN17b] Einzug halten und standardisierte Testkörper etablieren sich zur Ermittlung geometriebezogener Grenzwerte in Abhängigkeit von der verwendeten Maschine und dem Material [DIN18c]. Des Weiteren werden Standards zur Bewertung der Qualität und Definition grundlegender Anforderungen an additiv gefertigte Endprodukte entwickelt, welche den Einsatz additiv gefertigter Bauteile für Serienanwendungen unterstützen und weiter vorantreiben [DIN18b].

### 2.2.2 Materialextusion

Die Materialextusion, speziell die Verarbeitung mehrerer Baumaterialien innerhalb eines Fertigungsprozesses, spielt eine zentrale Rolle in der vorliegenden Arbeit. In diesem Zusammenhang erfolgt zunächst eine Abgrenzung der MEX zu weiteren, ausgewählten additiven Fertigungsverfahren, welche ebenfalls die Verarbeitung mehrerer Materialien in einem Bauteil ermöglichen. Anschließend wird das zugrundeliegende Verfahrensprinzip der MEX in Bezug auf die Schichtverbundgestaltung relevanter Adhäsionstheorien kurz beschrieben. Ein Überblick über verfügbare Materialien beschließt diesen Abschnitt.

#### Additive Fertigungsverfahren zur Herstellung von Multi-Material-Bauweisen

Generell lassen sich durch das Schichtbauprinzip der additiven Fertigung unterschiedliche Materialien einer Werkstoffklasse in einem Bauteil kombinieren, ohne dass ein zusätzlicher Fügeprozess erforderlich ist [Gib15, 409 f.; Ros14]. Die Kombination mehrerer Bau- und Stützmaterialien ist bereits in der Multi-Material-Bauweise impliziert, in dieser Arbeit wird darüberhinausgehend die Verwendung verschiedener Baumaterialien im Hinblick auf die lokale Integration spezifischer Funktionen auf Basis von Materialeigenschaften fokussiert. Diese Fähigkeit ist aufgrund der unterschiedlichen Funktionsprinzipien der einzelnen additiven Fertigungsverfahren unterschiedlich stark ausgeprägt [Ban18; Vae13]. Hybride Prozesse, wie bspw. die Kombination von extrusions- und pastenbasierten Verfahren, werden nicht näher betrachtet, da die Gestaltungsfreiheiten in der

Regel durch einen Trocknungsprozess eingeschränkt und somit auf oberflächige Strukturen beschränkt sind [Tan18]. Des Weiteren wird die Möglichkeit der Einbettung zusätzlicher Komponenten durch eine selektive Unterbrechung des Fertigungsprozesses in dieser Arbeit nicht explizit betrachtet (siehe hierzu z.B. [Gla15; Obe19]).

Tabelle 2.1 zeigt ausgewählte additive Fertigungsverfahren, welche eine generelle Herstellung von Multi-Material-Verbünden ermöglichen. Die Bewertung der Multi-Material-Fähigkeit erfolgt auf Basis von [Ban18; Kum18, 14 ff.; Vae13]. Es wird zwischen der Kombination von Materialien innerhalb einer Schicht (Baubene) und zwischen den Schichten (Baurichtung) differenziert. Ebenfalls wird zwischen diskreten und kontinuierlichen Materialübergänge unterschieden.

**Tabelle 2.1:** Gegenüberstellung ausgewählter additiver Fertigungsverfahren bezüglich Multi-Material-Fähigkeit

Verfahren	Multi-Material-Fähigkeit	Materialien	Potenziale und Limitierungen
MEX	+; Baurichtung und -ebene, diskrete (und kontinuierliche) Materialübergänge	P, C	+ große Materialauswahl (auch Komposite), gute Materialeigenschaften – geringe Auflösung, begrenzte Haftung unterschiedlicher Polymere
Poly-Jet/ Multi-Jet Modeling	++; Baurichtung und -ebene, diskrete und kontinuierliche Materialübergänge	P	+ hohe Auflösung, Oberflächengüte – begrenzte Materialauswahl, begrenzte Materialeigenschaften
PBF von Polymeren	–; Baurichtung (und -ebene), diskrete Materialübergänge	P, (C)	+ große Materialauswahl, gute Materialeigenschaften – mittlere Auflösung in Abhängigkeit der Partikelgröße
PBF von Metallen	—; Baurichtung, diskrete Materialübergänge	M	+ große Materialauswahl, gute Materialeigenschaften – mechanisch entfernbare Stützstrukturen, Materialkontamination, Beschichtung praktisch schwierig
Directed Energy Deposition	○; Baurichtung und -ebene, diskrete und kontinuierliche Materialübergänge	M	+ große Materialauswahl, gute Materialeigenschaften, hohe Auftragsrate – geringe Auflösung, schlechte Oberflächengüte/ Nacharbeit erforderlich

++ sehr gut, + gut, ○ mäßig, – begrenzt, — stark begrenzt; K: Kompositmaterialien, M: Metalle, P: Polymere; die Bewertung ist auf Basis von [Ban18; Kum18, 14 ff.; Vae13] erfolgt.

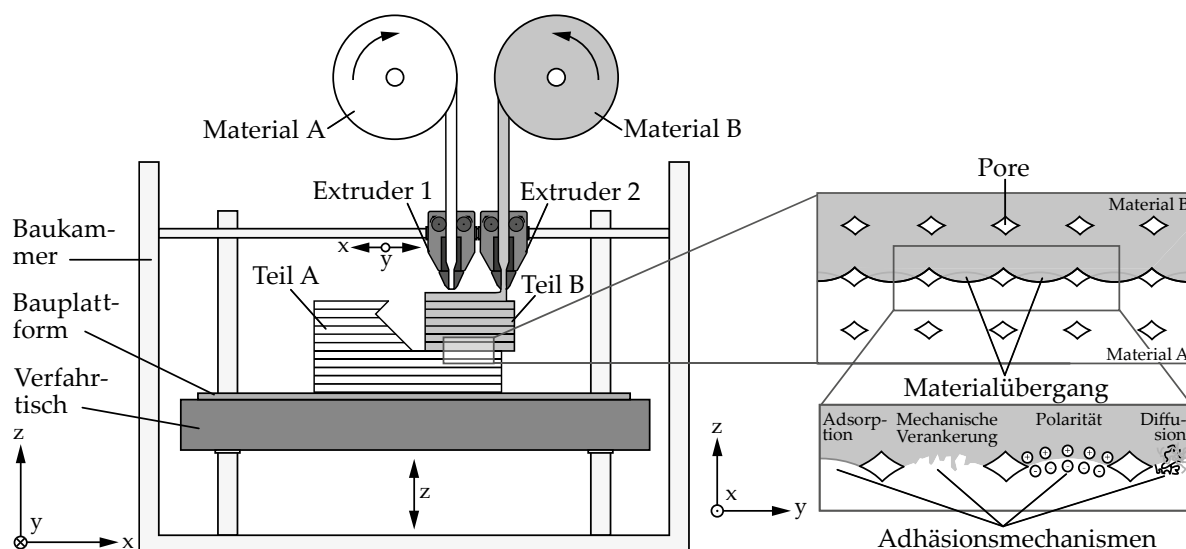
Im Bereich der polymerverarbeitenden additiven Fertigungsverfahren eignen sich vor allem die Materialeextrusion als auch das Poly-Jet- (PJM) und Multi-Jet-Modeling (MJM) zur Verarbeitung mehrerer Materialien innerhalb eines Bauteils. Aufgrund des Verfahrensprinzips des PJM und MJM lassen sich durch eine Mischung auch kontinuierliche Materialübergänge realisieren. Allerdings ist die Materialauswahl wie auch deren Eigenschaften im Vergleich zu anderen Verfahren aufgrund der UV-Aushärtung begrenzt. Die MEX erlaubt ebenfalls eine Kombination von Materialien innerhalb und zwischen den einzelnen Schichten. Vorteile der MEX sind die große Materialauswahl auch im Hinblick auf Komposite, die durch Füllstoffe gesteigerte mechanische oder zusätzlich elektrisch bzw. thermisch leitfähige Eigenschaften besitzen, sowie die einfache Handhabung des Prozesses. Ein Nachteil stellt hingegen die vergleichsweise geringe Auflösung dar [Ban18; Kum18; Vae13]. Darüber hinaus wurden Ansätze zur Realisierung kontinuierlicher Materialgradienten erforscht [Tau12] und Anwendungen bspw. im Bereich leitfähiger, wärmeabstrahlender Strukturen demonstriert [Zhu17b]. Auch wenn sich mit dem pulverbettbasierten Schmelzen (engl. powder bed fusion, PBF) von Metallen und Polymeren im Vergleich sehr gute mechanische Eigenschaften realisieren lassen, ist die Multi-Materialfähigkeit dieser Verfahren derzeit noch begrenzt [Ban18; Kum18; Vae13] und die Applikation unterschiedlicher Pulver zwischen zwei

Schichten bzw. innerhalb einer Schicht Stand der Forschung. Für Metalle existieren in diesem Zusammenhang u.a. Untersuchungen für die Kombination von Kupfer- und Stahllegierungen [Uhl17; Wal17]. Im Bereich der PBF von Polymeren werden Ansätze zur Kombination von zwei Materialien innerhalb einer Schicht durch einen selektiven Materialauftrag mittels Vibrationsdüse erforscht [Sti16]. Die Realisierbarkeit der Verarbeitung zwei unterschiedlicher Materialien innerhalb einer Schicht wurde bereits anhand von Polypropylen (PP) und Polyamid 12 (PA12) für das PBF-Verfahren demonstriert [Lau15]. Im Bereich der metallbasierten additiven Fertigungsverfahren lassen sich mit dem Verfahren des Materialauftrags mit gerichteter Energieeinbringung (engl. directed energy deposition, DED) durch einen düsenbasierten Materialauftrag Übergänge innerhalb und zwischen zwei Schichten realisieren, die sowohl diskret als auch kontinuierlich ausgeführt sein können [Mog12]. Allerdings ist die Auflösung des DED-Verfahrens begrenzt und erfordert in der Regel eine spanende Nachbearbeitung [Ban18; Kum18, 14 ff.; Vae13].

In dieser Arbeit wird die MEX als Verfahren zur Herstellung von Multi-Material-Bauteilen fokussiert. Dies liegt primär in der einfachen Handhabung des Prozesses wie auch der vergleichsweise großen Materialauswahl begründet, welche neben thermoplastischen Kunststoffen auch thermoplastische Elastomere und Kompositmaterialien umfasst. Letztere erlauben eine Integration zusätzlicher materialspezifischer Funktionen in einem Bauteil wie Dämpfung oder elektrische Leitfähigkeit [Ban18; Liu18]. Zudem können sowohl innerhalb als auch zwischen den Schichten Materialübergänge realisiert werden. Zwar wird die Anzahl der kombinierbaren Materialien noch durch die Anzahl der Extruder limitiert [Els09], es existieren aber bereits kommerziell verfügbare Werkzeugwechselsysteme wie der E3D Toolchanger. Darüber hinaus werden Ansätze zur Einbettung von Kohlenstoff- [Pru17] oder Aramidendlosfasern [Fis18] erforscht bzw. haben sich bereits in der Herstellung kohlenstoffendlosfaserverstärkter Bauteile etabliert (u.a. Mark One der Firma Markforged [Fis18]). Hierdurch wird eine deutliche Steigerung der mechanisch-technologischen Bauteileigenschaften in Bauebene ermöglicht und der Anwendungsbereich erweitert.

### Verfahrensprinzip der Materialextrusion und Adhäsionstheorien

Abbildung 2.2 zeigt eine schematische Darstellung des generellen Verfahrensprinzips der MEX mit zwei Extrudern zur Verarbeitung mehrerer Materialien in einem Bauteil. Zudem sind ausgewählte Adhäsionsmechanismen dargestellt, die für die Schichtverbunderzeugung relevant sind.



**Abbildung 2.2:** Verfahrensprinzip der Materialextrusion und der Darstellung des Materialübergangs und relevanter Adhäsionsmechanismen in Bezug auf eine MMM (angelehnt an [Awa09; Ott14, 12; Sch09, 13])

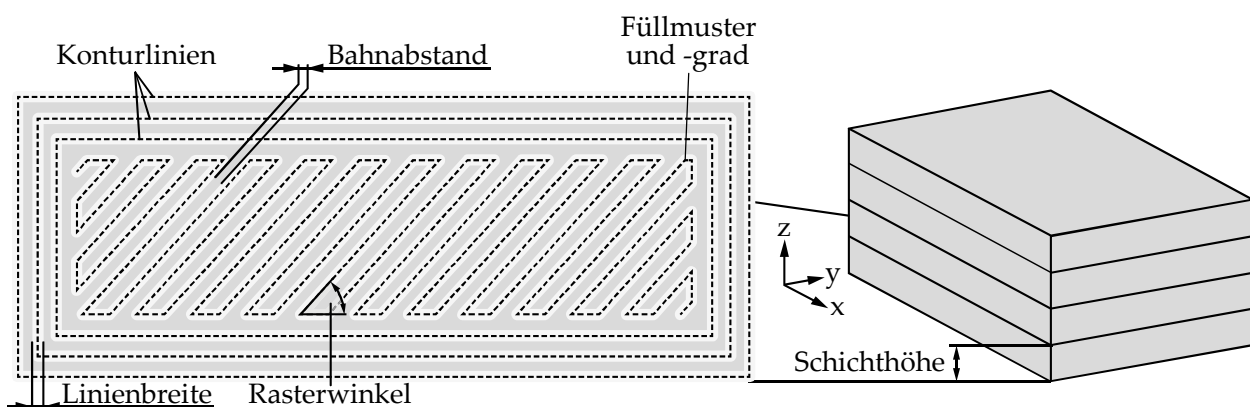
Bei dem Verfahren der Materialeextrusion, auch Fused Layer Modeling, handelt es sich um ein extrusionsbasiertes, einstufiges additives Fertigungsverfahren zur Verarbeitung thermoplastischer Polymere, welches Bauteilgeometrien auf einer Bauplattform durch das schichtweise Ablegen einzelner Materialstränge durch vorheriges Aufschmelzen und anschließendes Erstarren erzeugt [DIN18a; Geb16; Gib15; Ott14]. Das Ausgangsmaterial kann sowohl als strangförmiges Halbzeug (Filament) als auch in Form von Granulat vorliegen [VDI19]. Die schichtweise Bauteilgenerierung erfolgt durch eine nahezu drucklose Extrusion bzw. Ablage aufgeschmolzener raupenförmiger Materialstränge, welche zuvor in der Schmelzeinheit des Extruders oberhalb der materialspezifischen Schmelztemperatur in einen zähflüssigen Zustand überführt wurden [Geb16, 263 ff.; Gib15, 148 ff.; Ott14; VDI19]. Durch die eingebrachte thermische Energie werden benachbarte, bereits erstarrte Stränge wieder aufgeschmolzen, sodass durch die Ausbildung einer Interdiffusionszone ein Schichtverbund in Bauebene und -richtung entsteht. Neben der Temperatur wird die Ausbildung der Verbindungszone zusätzlich durch die Oberflächenspannung sowie einen Diffusionsprozess mit einem Verknäulen der Polymerketten bestimmt [Sun08; Tur14]. Aufgrund der ellipsenförmigen Stranggeometrie entstehen Poren innerhalb des Bauteils, sodass hieraus eine Anisotropie in den mechanisch-technologischen Eigenschaften resultiert [Ahn02; Klo16; Moh15].

In der Regel besitzen die Fertigungsanlagen eine zweite Extrudereinheit, die zur Verarbeitung eines Stützmaterials verwendet wird, um auf diese Weise die konstruktiven Freiheiten in Bezug auf Überhangstrukturen zu erweitern [Geb16, 263 ff.; Gib15, 148 ff.]. Die Materialpalette ist auf thermoplastische Kunststoffe begrenzt, da die Voraussetzung für eine Verarbeitbarkeit mittels MEX in der Aufschmelzbarkeit des Ausgangsmaterials besteht. Die Vielfalt der kombinierbaren Materialien innerhalb eines Bauteils wird in der Regel durch die Anzahl der Extruder begrenzt [Geb13, 73; Wen09] sowie durch die Materialkompatibilität, den Schmelzpunkt bzw. den Verarbeitungsbereich und den materialspezifischen Schrumpf bestimmt [Ban18; Vae13; Fis18, 81].

Die Materialkompatibilität der Polymere wird dabei durch unterschiedliche Adhäsionsmechanismen bestimmt. Hierbei wird generell zwischen mechanischer Adhäsion, also der Verankerung durch formschlüssige Verbindungen, und spezifischer Adhäsion unterschieden [Awa09; Sch09; Bro05, 15]. Die spezifische Adhäsion umfasst unterschiedliche Adhäsionstheorien, wobei für Verbindungen aus zwei oder mehreren Polymeren lediglich die Adsorptions-, Diffusions- und Polarisierungstheorie von Relevanz sind [Sch09, 12 ff.]. Die materialspezifische Oberflächenenergie wird als notwendige Voraussetzung für eine Benetzung gesehen, als Maß hierfür gilt der Spreitungsdruck. Eine Schwächung des Schichtverbunds kann hingegen aus einer Zwischenschicht resultieren (schwache Grenzschicht, engl. *weak boundary layers*), welche sich u.a. aufgrund von Verunreinigungen oder Lufteinschlüssen ausbilden kann [Awa09; Hab09, 327 ff.; Sch09, 14 ff.]. Die Diffusionstheorie beschreibt die Ausbildung eines Schichtverbunds und von Adhäsionskräften zwischen zwei Materialien aufgrund der Entstehung einer Interdiffusion. Diese wird durch die temperaturabhängige mikrobrownsche Bewegung der (Makro-)Moleküle und den Grad der Vernetzung der einzelnen Polymere beeinflusst [Bro05, 20 f.; Hab09, 330 f.; Sch09, 15]. Im Vergleich hierzu bestimmen bei der Adsorptionstheorie interatomare und -molekulare Kräfte die Verbundfestigkeit, die nur auf Basis einer ausreichenden Benetzung abhängig von den Oberflächenspannungen der Verbundpartner erfolgen kann, da die Reichweite der Bindungskräfte auf 1 nm limitiert ist [Sch09, 15 ff.]. Nach der Polarisierungstheorie werden die Wechselwirkungen in der Grenzschicht und somit die Verbundfestigkeit zudem durch die Polarität der Polymere, also den vorhandenen funktionellen Gruppen (z.B. Carboxyl- oder Hydroxylgruppen), bestimmt [Awa09; Bro05, 18 f.; Hab09, 330; Sch09, 18].

Da die resultierenden Bauteileigenschaften bei der additiven Fertigung maßgeblich durch die Wahl der Prozessparameter beeinflusst werden [Geb13; Geb16], resultieren hieraus einerseits Regeln in Bezug auf die Bauteilgestaltung, andererseits bieten sich dem Konstrukteur hierdurch neben der Geometrie zusätzliche Entwurfsvariablen im PEP. Die Prozessparameter beschreiben in der additiven Fertigung dabei einen „Satz von Betriebsparametern und Systemeinstellungen, die während eines Bauprozesses verwendet werden“ [DIN18a, 10]. Nachfolgend sind wesentliche Verfahrensparameter der MEX aufgeführt (siehe Abbildung 2.3), welche in Abhängigkeit zur Anlage und dem verwendeten Material sowie der Bauteilgeometrie individuell gewählt werden müssen, um einerseits eine reproduzierbare Verarbeitung sicherzustellen und andererseits die Anforderungen an das Bauteil zu erfüllen [Geb16; Gib15; Klo16; Moh15; Ott14; Tur14; VDI19; Wen09]:

- *Düsentemperatur*: Temperatur, mit welcher das Material extrudiert bzw. ausgetragen wird; der Temperaturbereich ist vom Material abhängig.
- *Bauplattform und Baukammertemperatur*: Temperatur der Bauplattform bzw. Baukammer in Bezug auf eine materialabhängige Temperierung zur Reduzierung thermisch induzierter Schrumpfungen während des Bauprozesses und zur Vorbeugung von Bauteilverzug.
- *Extrusions-/Verfahrgeschwindigkeit*: Geschwindigkeit, mit der das Material ausgetragen wird; diese ist abhängig vom Material und von der Bauteilgeometrie.
- *Schichthöhe/-dicke*: Höhe einer einzelnen Schicht; diese hängt vom Düsendurchmesser ab.
- *Konturlinienanzahl*: Anzahl der äußeren Begrenzungslinien.
- *Füllmuster und -orientierung*: Verfahrensweg zur Füllung einer Bauteilkontur; der Rasterwinkel innerhalb einer einzelnen Schicht bzw. Bauteilkontur ist dabei frei wählbar.
- *Füllgrad*: Grad der Füllung einer Bauteilkontur; ist innerhalb einer Bauteilkontur frei wählbar.
- *Linienbreite*: Breite eines abgelegten Materialstrangs; dieser hängt vom Düsendurchmesser ab.
- *Bahnabstand/Überlappung*: Abstand zwischen den einzelnen abgelegten Materialsträngen sowie der Füllung und den Konturlinien.
- *Flussrate*: Menge des ausgetragenen Materials; die Flussrate ist frei wählbar und kann z.B. zur Steuerung des Luftspalts zwischen den einzelnen Materialsträngen genutzt werden.

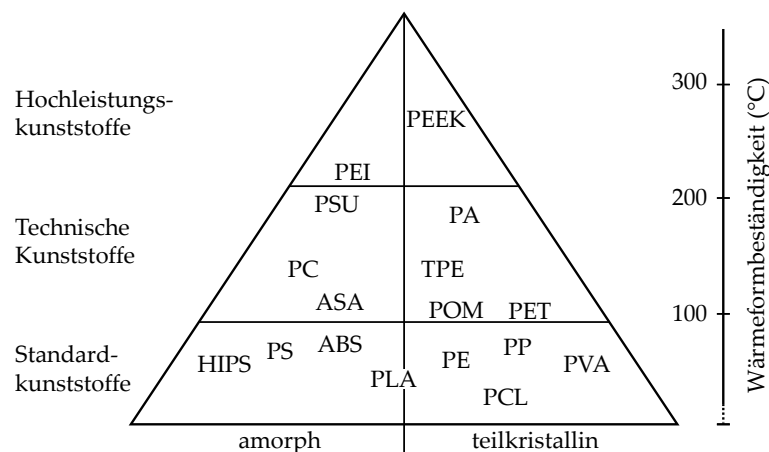


**Abbildung 2.3:** Darstellung wesentlicher Prozessparameter zur Erzeugung einer Schicht (angelehnt an [Moh15])

Die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Verfahrensparametern und ausgewählten, resultierenden Bauteileigenschaften sind in Abschnitt 5.2 näher beschrieben.

## Verfügbare Materialien

Aufgrund des Verfahrensprinzips der Materialextrusion, welches ein Aufschmelzen des Ausgangswerkstoffs voraussetzt, beschränkt sich die Materialauswahl auf thermoplastische Kunststoffe. Es lassen sich sowohl amorphe und teilkristalline Thermoplasten als auch thermoplastische Elastomere verarbeiten, sodass hieraus ein breites Spektrum an materialspezifischen Eigenschaften resultiert (siehe Abbildung 2.4). Neben Standard- und technischen Kunststoffen haben sich mittlerweile auch Hochleistungskunststoffe für die Verarbeitung mittels MEX etabliert, die den verwendeten Materialien der konventionellen Verfahren (z.B. dem Spritzgießen) in der chemischen Zusammensetzung sehr ähneln oder sogar identisch sind. Neben Baumaterialien sind (wasser-)lösliche bzw. mechanisch entfernbare Stützmaterialien verfügbar. Generell ist die Verarbeitung teilkristalliner und hochschmelzender Thermoplasten aufgrund der höheren Materialschwindung beim Abkühlvorgang schwieriger und erfordert eine höherwertige bzw. komplexere Anlagentechnik mit temperierter Baukammer. Die Anzahl der additiv verarbeitbaren Werkstoffe steigt kontinuierlich an, wobei im Kontext der Materialextrusion gefüllte Werkstoffe zunehmend an Bedeutung gewinnen, da durch die Verwendung von u.a. Carbon, Glas, Holz, Graphen oder metallischer Werkstoffe gezielt bspw. mechanisch-technologische oder elektrische Eigenschaften eingestellt werden können [Bau13; Ehr11; Geb16; Gib15; Klo16; Roo15; Ott14; VDI19].



**Abbildung 2.4:** Häufig eingesetzte und mittels MEX verarbeitbare thermoplastische Kunststoffe (Darstellung angelehnt an [Geb16, 477], basierend auf [Bau13; Ehr11; Geb16; Roo15; Rie12, 36])

Die Materialforschung fokussiert im Bereich der Kompositmaterialien unterschiedliche Füllstoffe (u.a. Kurzfasern und Nanopartikel aus Carbon, Glas, Graphen, Graphit oder Kupfer) zur Verbesserung sowie Erweiterung der physikalischen Eigenschaften [Moh17; Ngo18; VDI19]. Neben primär mechanisch-technologischen Eigenschaften wie Festigkeit und Steifigkeit werden zudem im Bereich der additiven Fertigung vermehrt elektrische oder thermische Eigenschaften fokussiert. Hierdurch ist eine lokale Integration spezifischer elektrisch leitender Funktionen oder sensorischer Strukturen möglich [Ban18; Moh17; Ngo18; Lei12; Liu18; Jay19; Rey18]. Ein weiteres intensiv beforschtes Feld bilden die sogenannten Formgedächtnispolymere (engl. Shape Memory Polymers, SMP), welche durch thermische oder feuchtigkeitsbedingte Aktivierung eine Geometrieänderung zu einem zuvor definierten Zustand vollziehen [Bod17; Mon17; Li17; Wu17].

### 2.2.3 Konstruktive Potenziale und Grenzen der Materialextrusion

Generell sind die inhärenten konstruktiven Potenziale und Grenzen bei allen additiven Fertigungsverfahren durch das zugrundeliegende Prinzip des schichtweisen Materialauftrags gleich, wobei

die jeweilige Verfahrensscharakteristik deren individuelle Ausprägung bestimmt. In diesem Abschnitt werden insbesondere die Potenziale und Grenzen der Materialextrusion beleuchtet. Allgemein gilt die MEX als vergleichsweise kostengünstige additive Fertigungstechnologie, die aufgrund der einfachen Handhabung des Prozesses Änderungen an der Anlagentechnik zulässt. Einen weiteren Vorteil des Verfahrens stellt der große Bauraum dar [Geb16; Gib15; VDI19]. Nachfolgend werden die erweiterten Konstruktionsfreiheiten, die verfahrensspezifische Anisotropie sowie Gestaltungsgrenzen und Nachbearbeitungsschritte der MEX näher beschrieben.

### **Erweiterte Konstruktionsfreiheiten**

Die einzigartigen Möglichkeiten der additiven Fertigungsverfahren lassen sich nach Rosen (2007/2014) und Gibson et al. (2015) in die vier Oberkategorien Form- und Materialkomplexität sowie funktionale und hierarchische Komplexität einordnen, aus denen sich die konstruktiven Potenziale ableiten. In der Formkomplexität werden die geometrischen Freiheiten sowie die Individualisierungsmöglichkeiten im Hinblick auf geringe Stückzahlen thematisiert. Die Materialkomplexität umfasst die Möglichkeit, unterschiedliche Werkstoffe in einem Bauteil zur Realisierung gradiertter Eigenschaften ohne zusätzlichen Fügeprozess zu kombinieren. Zudem können mittels AM gradierte Eigenschaften auch durch die Kombination von Konstruktionsmerkmalen unterschiedlicher Abmessungen (Mikro-, Meso- und Makroebene) erzeugt werden, z.B. in Form von Gitterstrukturen. Die Möglichkeit der direkten Fertigung beweglicher Baugruppen sowie die Einbettung von Komponenten zur Integration zusätzlicher Funktionen wird als funktionale Komplexität bezeichnet [Ros07; Ros14; Gib15, 404 ff.].

Hieraus leiten sich im Vergleich zu den konventionellen materialabtragenden oder formbasierten Verfahren erweiterte Konstruktionsfreiheiten ab, die ein hohes Potenzial für funktionsorientierte [Kla15] und -integrierte Bauteile bieten [Bec05; Geb14, 103 ff.; Geb16, 464; Yan16] sowie ein hohes Maß an Individualisierung und Personalisierung zulassen [Fis18, 35 ff.; Geb16, 466 ff.; Tho16]. Auf Gestaltebene lassen sich u.a. interne Kanalstrukturen zur Temperierung, hinterschnittige Strukturen wie (gradierte) Gitter mit variablen Zellgeometrien zur Versteifung oder Wärmeabfuhr und topologieoptimierte, bionische oder Hohlraumstrukturen mit geringem Füllgrad für Leichtbauanwendungen realisieren [Bec05; DP19; Emm11a; Emm11b; Geb16, 462 f.; Kam17; Ros07]. Als großer Vorteil der MEX wird die bereits erläuterte Multi-Material-Fähigkeit in Kombination mit der breiten Materialauswahl angesehen [Ban18; Els09; Fis18; Geb13, 73; Vae13]. Da – bis auf die Verwendung von Stützen – nur dort Baumaterial eingesetzt wird, wo dies zum Aufbau der Bauteilgeometrie erforderlich ist, und somit kaum Abfall entsteht, ermöglicht die MEX im Hinblick auf eine MMB auch den Einsatz kostenintensiver Materialien [Ngo18]. Neue Entwicklungen im Bereich von Funktionsmaterialien – vorzugsweise mit nicht mechanisch-technologischen Zusatzeigenschaften wie elektrischer oder thermischer Leitfähigkeit oder bestimmter optischer oder Formgedächtniseigenschaften erweitern die Gestaltungsmöglichkeiten stetig und ermöglichen ein hohes Maß an Funktionsintegration wie auch -erweiterung. Zusätzlich zur Bauteilgeometrie können die Bauteileigenschaften durch den Bauprozess (z.B. Bauteilorientierung und Prozessparameterwahl) definiert verändert und so gezielt anisotropes Verhalten generiert werden [Ash04; Geb16; Moh15].

### **Verfahrensspezifische Anisotropie**

Bei der additiven Fertigung entstehen die resultierenden Bauteileigenschaften während des Bauprozesses und werden neben der Wahl des Ausgangsmaterials und der Geometrie v.a. durch die verfahrenstypische Anisotropie und die Wahl der Prozessparameter bestimmt [Geb16, 3; Gib15,



165; Moh15; VDI19]. Dies stellt einerseits eine Herausforderung, andererseits aber eine Erweiterung der konstruktiven Freiheiten dar, sofern die Abhängigkeiten zwischen den Prozessparametern und Bauteileigenschaften beachtet werden [Bou14; Tho16]. Bei der MEX werden die resultierenden mechanisch-technologischen Eigenschaften maßgeblich durch die Bauteilorientierung bestimmt, wobei Zugfestigkeit, E-Modul und Bruchdehnung in Baurichtung aufgrund des schwächeren Schichtverbunds deutlich geringer als in Bauebene sind [Ahn02; Kir11; Moh15]. Weiterhin bestimmen das Füllmuster, dessen Orientierung und der Füllgrad sowie die Extrusionstemperatur die resultierenden mechanisch-technologischen (u.a. [Klo16; Moh15]), aber auch elektrischen Bauteileigenschaften in hohem Maß (u.a. [Dul18; Ham17; Wat17a]). Bei faserverstärkten Polymeren ist die Abhängigkeit von der Strangorientierung aufgrund einer inneren Ausrichtung der Fasern verstärkt [Tek14]. Zudem kann die innere Porosität der Bauteile infolge der höheren Wärmeleitfähigkeit des Füllstoffs reduziert werden, woraus eine zusätzliche Steigerung der mechanisch-technologischen Eigenschaften resultiert [Sun08; Tek14]. Tabelle 2.2 stellt ausgewählte physikalische Bauteileigenschaften und Prozessparameter der MEX hinsichtlich deren Beeinflussbarkeit gegenüber. Die Bauteilorientierung wird als Verfahrensparameter in diesem Zusammenhang nicht mit betrachtet. Generell spiegeln sich in der Bewertung die Auswirkungen der einzelnen Verfahrensparameter auf die Kompaktheit des Schichtverbunds wider, die sich wiederum auf die individuellen Bauteileigenschaften auswirkt.

**Tabelle 2.2:** Beeinflussung von Verfahrensparametern der MEX auf ausgewählte Bauteileigenschaften

Resultierende Bauteileigenschaft	Verfahrensparameter									
	Extrusion-/ Düsentemp.	Plattform-/ Kammertemp.	Verfahrge- schwindigkeit	Schichthöhe bzw. -dicke	Konturlinien- anzahl	Füllmuster/ -orientierung	Füllgrad	Linienbreite	Bahnabstand	Flussrate
Mechanisch-technologische Eigenschaften										
Festigkeit (Zug/Biegung)	●	○	○	○	○	●	●	○	○	○
Steifigkeit (Zug/Biegung)	○	○	○	○	○	●	●	○	○	○
Bruchdehnung	○	○	○	○	○	●	●	○	○	○
Thermische Eigenschaften										
Wärmeleitfähigkeit	○	○	○	○	○	○	●	○	○	○
Wärmeausdehnung				○	○	○	●	○	○	
Elektrische Eigenschaften										
Elektrische Leitfähigkeit	○	○	○	●	○	●	●	○	●	○
Optische Eigenschaften										
Transparenz	○	○	○	○	○	●	●	○	●	●
Glanz/Mattheit	●		○	○	○					○

● starker Einfluss; ○ moderater Einfluss; ○ geringer Einfluss

Bewertung basiert auf [Ada15; Ahn02; Ahn09; Chr17; Dul18; Gna17; Ham17; Fis18; Geb16; Kim17; Kim18; Kir11; Klo16; Kwo17; Moh15; Pop18; Pru17; Rey18; Sun08; Tan18; Tek14; Wat17a; Wen09; Zha16; Zha17]

## Gestaltungsgrenzen

Als allgemeiner Nachteil der MEX gegenüber anderen additiven Fertigungsverfahren werden die niedrige Baugeschwindigkeit und die geringe Auflösung in Bauebene und Baurichtung angesehen. In Bauebene wird die Auflösung durch die minimale Extrusionsbreite bestimmt. Da im Hinblick auf die mechanische Stabilität Strukturen aus mindestens zwei Linien aufgebaut werden sollten,

wird die Herstellung sehr filigraner Strukturen aufgrund grober Düsendurchmesser und der Anlagenkinematik erschwert. In Baurichtung begrenzt hingegen der Düsendurchmesser infolge des Extrusionsverhältnisses die minimale Schichthöhe, was sich aufgrund des sogenannten Treppeneffekts v.a. nachteilig auf die resultierende Oberflächenrauheit an Überhangstrukturen wie auch innerhalb von Kanalstrukturen oder Bohrungen auswirkt. Darüber hinaus schränken die verfahrensbedingten Ansatzpunkte das äußere Erscheinungsbild ein. Die Notwendigkeit des Abstützens von Überhangstrukturen resultiert ebenfalls in einer gesteigerten Oberflächenrauheit in den abgestützten Bereichen und erfordert zudem eine Zugänglichkeit für deren Entfernung. Enge Spalte v.a. in Baurichtung sind ebenfalls schwer herzustellen [Ada15; Hoc08; Kir11; VDI19]. Die Maßhaltigkeit wird in diesem Zusammenhang ebenfalls durch das Auflösungsvermögen in Bauebene und -richtung bestimmt, sodass die Bauteilabmessungen an die Linienbreite wie auch Schichthöhe anzupassen sind, sofern eine spanende Nacharbeit vermieden werden soll [Ada15; Hoc08; Kir11; VDI19]. Des Weiteren kann die Maßhaltigkeit durch den thermisch induzierten Bauteilverzug aufgrund der materialspezifischen Schrumpfung infolge des Abkühlprozesses des extrudierten Materials negativ beeinflusst werden [Arm18; VDI19; Wan07].

Hieraus ergeben sich für die MEX u.a. Grenzen in der Herstellung von filigranen dreidimensionalen Strukturen wie Gitter, von Kanalstrukturen mit geringen Durchmessern oder von beweglichen Baugruppen wie Verzahnungen und Scharnieren. Die quantitativen Grenzwerte und Toleranzen für spezifische Konstruktionselemente hängen stark von der verwendeten Fertigungsanlage, dem Material sowie den gewählten Prozessparametern ab, sodass an dieser Stelle auf deren Angabe verzichtet wird. Die in der Literatur angegebenen Grenzwerte können als Anhaltspunkte dienen und sind in verschiedenen Regelsammlungen zu finden (u.a. [Ada15; Hoc08; Kir11; VDI19]).

Neben der Oberflächenrauheit und den erforderlichen Stützstrukturen muss bei der Bauteilgestaltung und der Festlegung der Bauteilorientierung primär die vergleichsweise große verfahrensspezifische Anisotropie der mechanisch-technologischen Bauteileigenschaften berücksichtigt werden. Dadurch wird die Gestaltungsfreiheit eingeschränkt und ggf. eine Bauteiltrennung mit anschließendem Fügeprozess notwendig [Ada15; Fis18; Gib15, 57 f.; Hoc08; Kir11; VDI19]. Bei der Verarbeitung bestimmter Materialien (z.B. TPU) kann es zu einer Fadenbildung und Einschränkung der Optik und Bauteilfunktion kommen. Gefüllte Materialien neigen bei geringen Düsendurchmessern hingegen zu einem Verstopfen, sodass die Auflösung beschränkt ist, und resultieren in einem erhöhten Verschleiß [Geb13, 73].

### **Nachbearbeitung und Folgeprozesse**

Verfahrensspezifische Folgeprozesse sind bei der Materialextrusion aufgrund der oben genannten Grenzen v.a. im Hinblick auf die Entfernung von Stützstrukturen, die Erreichung geometrischer Genauigkeiten und Oberflächenveredelungen erforderlich. Da die einzelnen Nachbearbeitungsschritte zeit- und kostenintensiv sind, sollten diese nach Möglichkeit durch konstruktive Maßnahmen minimiert werden [Gib15, 55 ff., 329 ff.; VDI19].

Die Entfernung von Stützstrukturen ist bei mittels Materialextrusion hergestellten Bauteilen in der Regel unverzichtbar und kann je nach verwendetem Stützmaterial durch Auswaschen oder mechanisch erfolgen. Durch die Berücksichtigung entsprechender Zugänglichkeiten in der Bauteilkonstruktion kann die Gestaltungsfreiheit hierdurch eingeschränkt werden, z.B. in Bezug auf innenliegende Kanal- oder Gitterstrukturen. Zudem kann nach Entfernung der Stützkonstruktionen eine Oberflächennachbearbeitung aufgrund von erhöhter Oberflächenrauheit oder Defekten erforderlich sein [Ada15; Geb16; VDI19; Fis18].

Zur Eliminierung verfahrensspezifischer Maßabweichungen und zur Herstellung von Passungen oder Gewinden werden in der Regel subtraktive Fertigungsverfahren eingesetzt. Bei der Konstruktion muss darauf geachtet werden, dass ein entsprechendes Aufmaß vorgesehen wird und die Zugänglichkeit gewährleistet ist. Zudem kann es zu Schichtablösungen kommen, wenn die Bauteil- oder Füllmusterorientierung ungünstig gewählt wird [Ada15; VDI19].

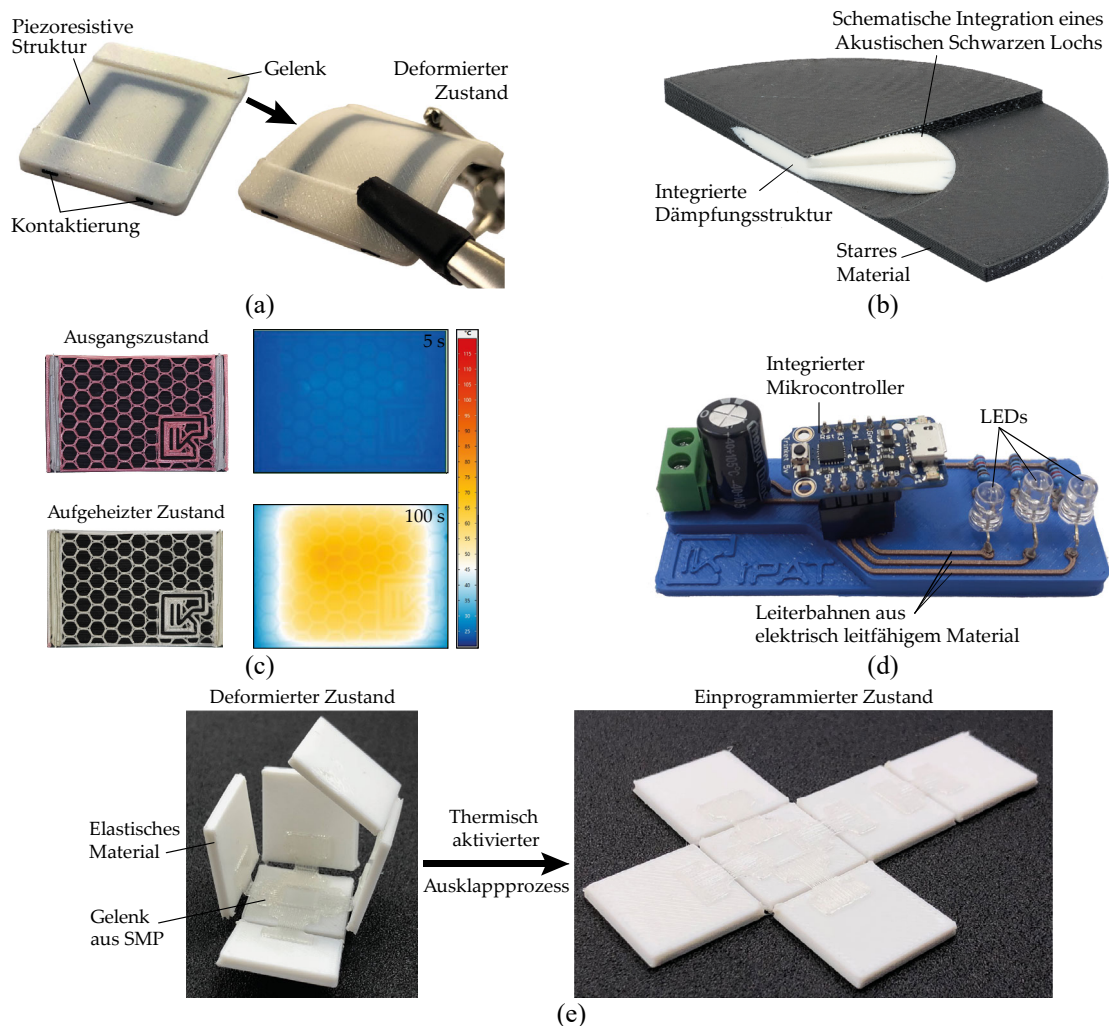
Zur Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit der Bauteile existieren unterschiedliche Veredelungsverfahren, wobei zwischen abtragenden, chemischen und thermischen Verfahren differenziert wird. Zur Glättung werden sowohl mechanische – u.a. (Gleit-)Schleifen und Polieren – und thermische Verfahren als auch chemisches Bedampfen eingesetzt. Eine Glättung bewirkt in der Regel zugleich eine Verrundung von Kanten, was es bei der Anwendung der Verfahren zu beachten gilt. Zur Aufwertung der Bauteiloberfläche werden Strahlverfahren oder Wassertransferdruck genutzt. Darüber hinaus können Beschichtungsverfahren wie das Galvanisieren zur Verbesserung der mechanisch-technologischen Bauteileigenschaften eingesetzt werden [Fis18, 30 ff.; VDI19].

#### 2.2.4 Anwendungen mittels Materialextrusion hergestellter Multi-Material-Bauteile

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über Multi-Material-Bauteile gegeben, die mittels MEX hergestellt sind, um das Potenzial additiv gefertigter MMB zu demonstrieren. Bei einem Großteil der Anwendungen handelt es sich zwar noch um prototypische Anwendungen, diese zeigen aber bereits die konstruktiven Möglichkeiten und das Potenzial im Hinblick auf Funktionsintegration und -erweiterung. Im Allgemeinen können die Anwendungen nach der Art der integrierten Funktion wie elektrische Leitfähigkeit oder Elastizität unterschieden werden, sodass nachfolgend eine gegliederte Aufführung und kurze Beschreibung ausgewählter Beispiele erfolgt. Abbildung 2.5 zeigt exemplarisch ausgewählte Multi-Material-Bauteile für unterschiedliche Anwendungen.

- **Kombination *mechanisch-technologischer* Funktionen:** Generell lassen sich die Anwendungen im Bereich der Kombination unterschiedlicher mechanisch-technologischer Eigenschaften in Strukturen zur lokalen Versteifung und zur Integration elastischer Funktionen gliedern, z.B. zur Dämpfung oder zum Führen von Bewegungen. Eine Kombination von zwei Materialien mit unterschiedlichen Steifigkeiten kann als innere Versteifungsstruktur in einem Zahnrad sowie als Verstärkung an den Zahnflanken [Mos17] oder in Sandwichbauweisen als gitterförmiger, verstärkender Kern eingesetzt werden [Esp14]. Zudem lassen sich flexible Elemente wie luftleere Reifen (engl. airless tires) aus einem Verbund von einem steifen und einem flexiblen Material fertigen, die bspw. an einem Fahrrad [Big18a], Elektromotorrad [Big18b] oder Modellauto [Deg18] Anwendung finden. Ein weiteres Anwendungsfeld für diese Materialkombination sind integrierte flexible Strukturen zur Realisierung von Gelenken [Col17; Fan18], bistabilen Faltmechanismen [Sau18], anpassbaren Greifwerkzeugen [Big18b] oder Schließmechanismen [3dr17; Ion16]. Die Integration passiver Dämpfungsstrukturen wurde u.a. anhand einer elastischen, wabenförmigen Struktur in einem Sitz [Big18b] sowie in Balkenelementen zur lokalen Dämpfung von Körperschall mittels Methode der Akustischen Schwarzen Löcher (ASL) demonstriert [Rot17; Rot18]. Die Verformbarkeit elastischer Materialien wird weiterhin zur Realisierung einer integralen Unterwasser-Vortriebseinheit genutzt [Fis18, 81, 165 ff.].
- **Integration *elektrischer* und *sensorischer* Funktionen:** Kompositmaterialien mit elektrisch leitfähigen Eigenschaften ermöglichen die Integration elektrischer Komponenten, wärmeemittierender und sensorischer Strukturen. Die Realisierung elektrischer Komponenten wie Widerstände, zwei- und dreidimensionale bzw. flexible Leiterbahnen [3de15; Ham17; Kwo17;

Mul18; Zha16] sowie piezoresistiver und kapazitiver Eingabeelemente (z.B. Taster, Touchpanel, Schieberegler) [Bur15; Lei12] wurde mit unterschiedlichen Kompositmaterialien vielfach demonstriert. Zur Integration sensorischer Funktionen können zudem additiv gefertigte piezoresistive Elemente aus leitfähigen Materialien in flexible Strukturen integriert werden, um Verformungen zu detektieren [Kim17; Kwo17; Lei12; Zha16]. Die Temperaturabhängigkeit bestimmter Füllstoffe wird zur Herstellung von Temperatursensoren genutzt [Kwo17], wohingegen kapazitive Änderungen leitfähiger Strukturen zur Realisierung integrierter Sensoren z.B. zur Bestimmung des Hohlraumanteils in Luft-Wasser-Strömungen eingesetzt werden [Jay19]. Durch die Nutzung der Widerstandserwärmung von elektrischen Leitern lassen sich weiterhin flächige, homogene [Dul18; Wat17a] oder heterogene wärmeabstrahlende Strukturen [Zhu17b] realisieren bzw. integrieren. In Kombination mit einem thermisch aktivierten farbwechselnden Material (thermochrome Eigenschaften) können zusätzlich optische Signale bzw. Hinweise in die Bauteilstruktur integriert werden [Wat17a]. Ein weiterer vielversprechender Forschungsansatz unter Verwendung leitfähiger Materialien stellt die additive Fertigung von Lithium-Ionen-Batterien dar, die in Bekleidungen integriert werden können. Ein Beispiel hierfür ist die erfolgreiche Integration einer Batteriestruktur in den Bügeln einer Sonnenbrille, um ein in den Gläsern verbautes LCD-Display mit Energie zu versorgen [Rey18].



**Abbildung 2.5:** Ausgewählte additiv gefertigte Multi-Material-Bauteile: (a) Gelenk mit integriertem piezoresistivem Sensor [Wat19c], (b) integrierte Dämpfungsstruktur, (c) integrierte wärmeerzeugende Struktur kombiniert mit einem thermochromen Material [Wat19a], (d) additiv gefertigte Leiterbahnen zur Steuerung von LEDs, (e) faltbare Struktur mit Gelenken (SMP) [Sch19] (selbst erstellte Fotoaufnahmen)

- Integration *magnetischer* Funktionen: Durch die lokale Einbettung magnetischer Materialien lassen sich unterschiedliche Funktionen realisieren. Ein prototypisches Anwendungsbeispiel einer in einem Stück gefertigten rotierenden Blutpumpe zeigt das Potenzial der additiven Fertigung für magnetische Strukturen in Kombination mit integral gefertigten beweglichen Baugruppen. Zur Lagerung wurden in das Gehäuse und in den Impeller der Pumpe magnetische Strukturen integriert, die im Anschluss an den Fertigungsprozess magnetisiert wurden. Auf diese Weise konnte ein Lagerkonzept für den Rotor, bestehend aus zwei passiven Magnetlagern, sowie ein Antrieb durch magnetische Strukturen im Rotor realisiert werden [Pet18].
- Integration *zeitlich veränderlicher* Funktionen: Die Verwendung von Shape Memory Polymeren ermöglicht die Realisierung zeitlich abhängiger Funktionen, z.B. mittels thermisch aktivierter Geometriedeformation in einen bei der Herstellung einprogrammierten Zustand. Auf diese Weise können Gelenke aus einem SMP in Bauteilstrukturen integriert werden, um thermisch aktivierte Aufklappmechanismen oder Aktuatoren herzustellen [Mon17; Nam19]. Hierdurch lassen sich bspw. thermisch aktivierte Sicherheitsmechanismen integrieren oder sich durch Geometriedeformation selbst montierende Bauteile entwickeln.

### 2.3 Konstruieren für additive Fertigungsverfahren (DfAM)

Die Anzahl an Methoden und Hilfsmitteln zur systematischen Unterstützung des Produktentwicklers im Hinblick auf eine zielgerichtete Nutzung der konstruktiven Freiheiten im Rahmen verfahrensspezifischer Grenzen nimmt stetig zu und wird als eine wesentliche Voraussetzung für den Einsatz additiv gefertigter Serienbauteile bzw. Endprodukte gesehen [Gib15, 399 ff.; Lav17; Pra18a; Ria16]. Das Forschungsfeld des DfAM ist aus den Bereichen des DFM und DFA entstanden [Boo11; Gib15, 401 ff.], um die verfahrensspezifischen Besonderheiten der additiven Fertigung u.a. hinsichtlich Geometrie, Materialzusammensetzung und Mikrostruktur für bestmögliche Produkteigenschaften nutzbar zu machen und das DFMA neuzudenken [Gib15, 404 ff.; Ros07].

Neben spezifischen, oft rechnergestützten Werkzeugen, welche eine gezielte Bauteilverbesserung in Bezug auf eine bestimmte Eigenschaft wie Gewicht fokussieren (z.B. Topologieoptimierung), haben sich im Forschungsfeld des DfAM allgemeine Methoden etabliert, die eine ganzheitliche und stärker qualitative Betrachtung des Produkts im Hinblick auf eine Vielzahl an Eigenschaften ermöglichen [Tan16]. Eine ganzheitliche Nutzung der AM-spezifischen konstruktiven Freiheiten erfordert eine frühzeitige Berücksichtigung dieser Möglichkeiten im Produktentwicklungsprozess. Nach Pradel et al. (2018) [Pra18a] sollten die Gestaltungsmöglichkeiten in der industriellen Praxis bereits im Konzeptionsprozess betrachtet werden und nicht erst in der Ausarbeitungsphase Berücksichtigung finden, wenn der Gestaltungsspielraum vergleichsweise gering ist und in der Regel mit hohen Kosten einhergeht. Speziell in der Bauteilkonzeption müssen sowohl eine Loslösung fertigungsbedingter Denkbarrieren [See14] sowie eine Führung des Produktentwicklers in Bezug auf Grenzen der Anwendbarkeit bestimmter AM-Potenziale erfolgen [Pra18a], um diese in der Produkt- bzw. Bauteilgestaltung sinnvoll und zielgerichtet berücksichtigen zu können. In der „Roadmap for Additive Manufacturing“ wird der Bedarf für die Entwicklung von Methoden zur Bauteilkonzeption hinsichtlich der Unterstützung des Produktentwicklers im Ausnutzen der einzigartigen Konstruktionsmöglichkeiten von AM, u.a. in Bezug auf MMB, spezifiziert [Bou14].

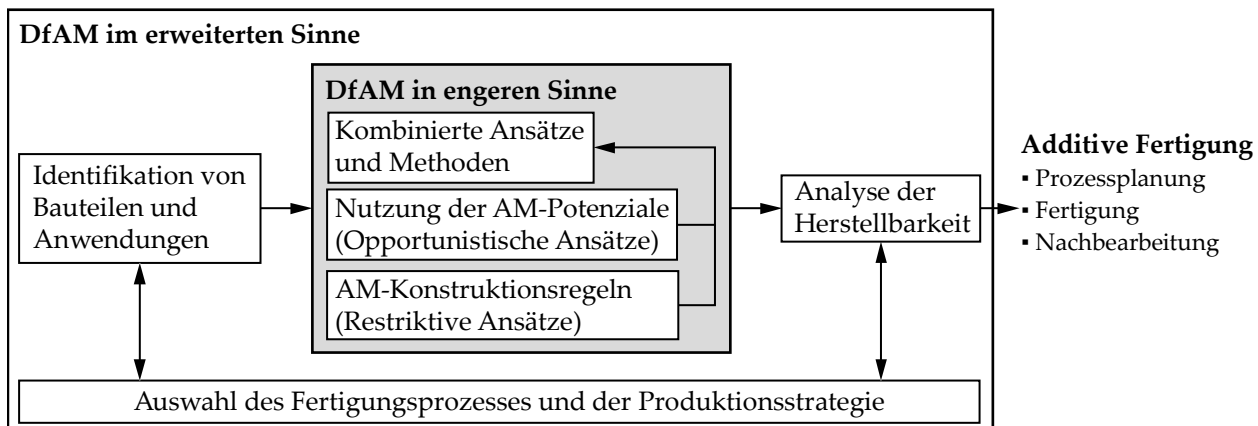
Da der Fokus dieser Arbeit auf einer systematischen Wissensbereitstellung für die MMAM mittels MEX und deren systematischer Berücksichtigung in der Produktentwicklung liegt, werden vorzugsweise allgemeine DfAM-Methoden und -Hilfsmittel betrachtet. Es werden speziell solche

Methoden analysiert, die eine Führung bzw. Handlungsempfehlungen innerhalb der Produktentwicklung geben. Von besonderem Interesse sind solche DfAM-Ansätze, welche eine realistische Bauteilkonzeption unterstützen, indem bspw. Wissen in Bezug auf verfahrensspezifische Potenziale und Grenzen bereitgestellt wird.

In Abschnitt 2.3.1 wird zunächst eine Kategorisierung bestehender DfAM-Ansätze dargestellt, bevor ausgewählte Methoden und Hilfsmittel in den Abschnitten 2.3.2 bis 2.3.4 beschrieben werden. Hieraus werden in Abschnitt 2.4 anschließend konkrete Forschungsbedarfe in Bezug auf die methodische Unterstützung für die MMM abgeleitet.

### 2.3.1 Kategorisierung bestehender Ansätze des Design for Additive Manufacturing

Nach Kumke et al. (2016) [Kum16] lassen sich die unterschiedlichen Methoden und Hilfsmittel des DfAM generell in Ansätze gliedern, die dem Forschungsgebiet im erweiterten und im engeren Sinne zugehören (siehe Abbildung 2.6). DfAM-Ansätze im engeren Sinne umfassen Konstruktionsregeln und Methoden zur Unterstützung der Nutzung AM-spezifischer Potenziale. Erstere fokussieren die Sicherstellung der Herstellbarkeit und werden als restriktiv bezeichnet, wohingegen letztere auf eine breite Nutzung der konstruktiven Freiheiten abzielen und als opportunistisch klassifiziert werden. Weitere DfAM-Ansätze kombinieren sowohl opportunistische als auch restriktive Elemente. Hierzu zählen u.a. Vorgehensmodelle, welche isolierte Methoden und Hilfsmittel integrieren [Kum16; Lav15]. DfAM im erweiterten Sinne umfasst die methodische Unterstützung im Hinblick auf eine systematische Bauteilidentifikation wie auch Prozess- und Produktionsstrategieauswahl. Darüber hinaus zählen hierzu Ansätze, die zur Überprüfung der Herstellbarkeit dienen. Ansätze des DfAM im erweiterten Sinne werden in dieser Arbeit nicht betrachtet.



**Abbildung 2.6:** Kategorisierung bestehender methodischer Ansätze im Bereich des DfAM (basierend auf [Kum16])

Restriktive DfAM-Ansätze unterstützen den Produktentwickler bei der Sicherstellung der Herstellbarkeit von Bauteilen v.a. in der Entwurfs- und Ausarbeitungsphase und sind derzeit noch vorherrschend [Lav15]. Einerseits wird die Einhaltung geometriespezifischer Grenzen, wie Mindestwandstärken oder minimale Bohrungsdurchmesser, durch quantitative Vorgaben gefördert. Andererseits werden in den Regelsammlungen Einflüsse der Bauteilorientierung bspw. auf Oberflächengüte oder mechanisch-technologische Eigenschaften beschrieben und nachgelagerte Prozesse, wie das Entfernen von Stützmaterial oder spanende Nachbearbeitungsverfahren zur Reduzierung der Oberflächenrauheit, betrachtet, um bestimmte Qualitätsforderungen einzuhalten.

Im Gegensatz dazu fokussieren die opportunistischen DfAM-Ansätze eine nutzenorientierte Anwendung der hinzugewonnenen konstruktiven Freiheiten der additiven Fertigung speziell in der

Bauteilkonzeption [Lav15]. Sie fördern die Kreativität durch eine Loslösung fertigungsbedingter Denkbarrieren und forcieren so ein Überdenken der Produktgestaltung. Somit zielen diese Ansätze primär auf die Erweiterung des Lösungsraums und die Generierung eines Mehrwerts infolge einer umfassenden Anwendung AM-spezifischer Potenziale ab und sind nicht alleine auf die Einhaltung verfahrensspezifischer Restriktionen im Hinblick auf die Fertigung beschränkt.

Kombinierte DfAM-Ansätze und Methoden verbinden opportunistische und restriktive Ansätze und bieten dem Produktentwickler eine effektive Führung und phasenübergreifende Unterstützung im Produktentwicklungsprozess [Kum16]. Auf diese Weise wird sowohl eine systematische Anwendung der AM-spezifischen Gestaltungsmöglichkeiten und das Überdenken bestehender Produktarchitekturen gefördert als auch die Einhaltung verfahrensspezifischer Grenzen sichergestellt, die bereits in der Ideengenerierung und Konzeptauswahl mitberücksichtigt werden.

Basierend auf der in Abbildung 2.6 getroffenen Kategorisierung der bestehenden DfAM-Ansätze werden nachfolgend ausgewählte Methoden und Hilfsmittel beschrieben und diskutiert.

### 2.3.2 Kombinierte Ansätze im Design for Additive Manufacturing

Im Bereich der kombinierten Ansätze des DfAM wurden unterschiedliche Vorgehensmodelle und Methoden entwickelt, die von allgemeinen, ganzheitlichen Entwicklungsmethodiken über Vorgehen zur Berücksichtigung spezifischer Verfahrenspotenziale wie der MMAM oder bionischer Prinzipien bis hin zu Methoden speziell zur Unterstützung einzelner Phasen des PEP wie der Ideengenerierung reichen.

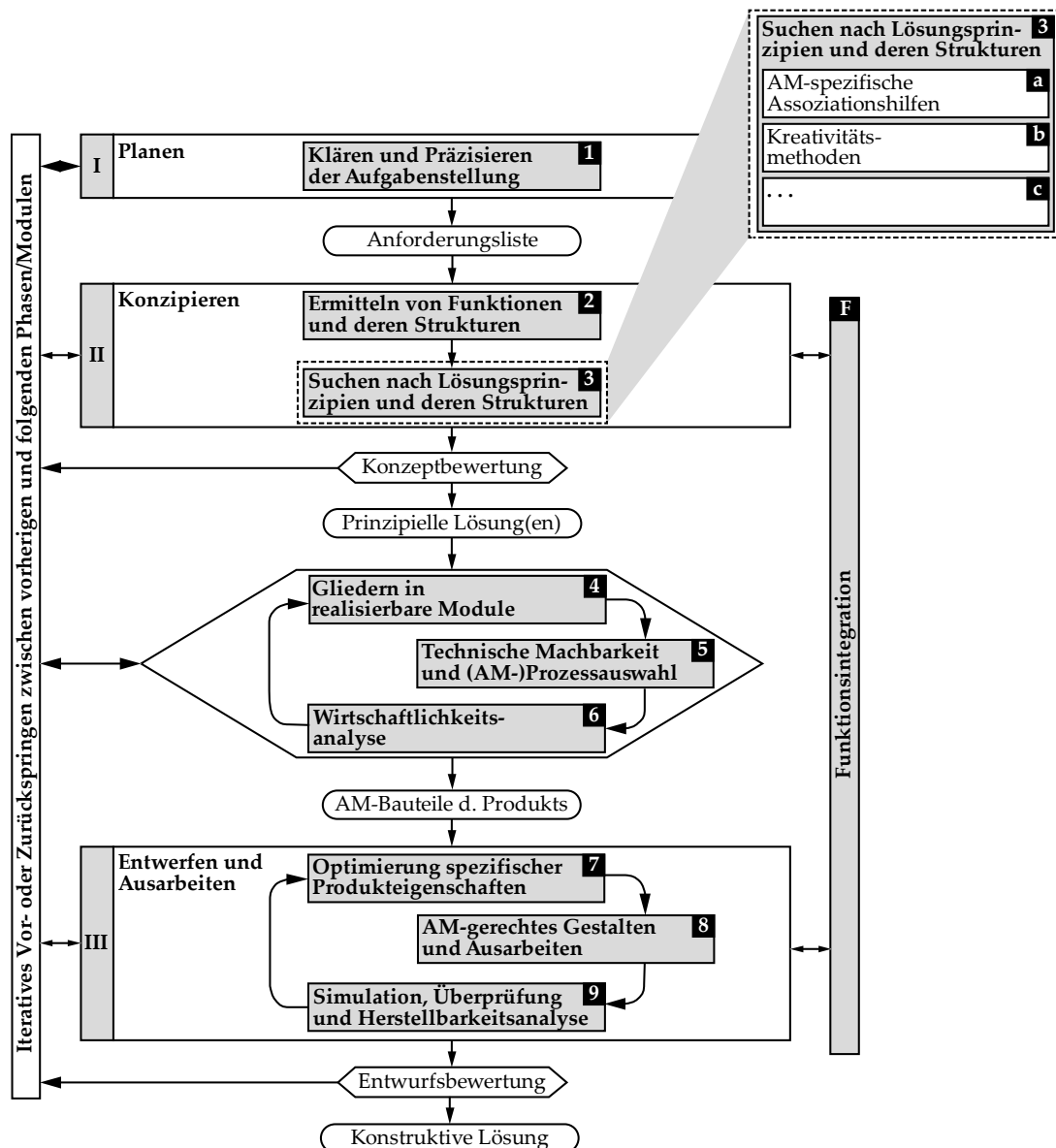
Ein vergleichsweise allgemein gehaltenes Vorgehen zur Unterstützung einer Produktumgestaltung mit dem Fokus der Funktionsintegration wurde von Yang und Zhao (2015) [Yan15b] entwickelt. Neben der Funktionsintegration bzw. Integralbauweise stellt die Strukturoptimierung ein explizites Element der Methode dar. In einer weiteren Arbeit spezifizieren Yang et al. (2015) [Yan15a] die Methode im Hinblick auf die Strukturoptimierung, indem basierend auf Funktionsflächen integrale Bauteilstrukturen mit integrierten Gittern im Hinblick auf minimales Gewicht optimiert werden. Als Ausgangspunkte der Methode können unterschiedliche Repräsentationsformen des anzupassenden Bauteils bzw. Produkts dienen, wie CAD-Modelle oder funktionelle und leistungsspezifische Anforderungen. Zudem integriert das Vorgehen prozessspezifische Randbedingungen.

Die Möglichkeiten der Funktionsintegration stehen in der Entwicklungsmethodik nach Boyard et al. (2014) [Boy14] ebenfalls im Fokus, in dem AM-spezifische Gestaltungsmöglichkeiten in Bezug auf das DFA und das DFM auf Basis eines Funktionsgraphen analysiert werden. Die beiden Schritte des DFA und DFM werden parallel ausgeführt, wobei im Schritt des DFA das Ziel der Aktivitäten eine Reduzierung der Bauteilanzahl darstellt (opportunistisches Element) und der Schritt des DFM auf die Sicherstellung der Herstellbarkeit abzielt (restriktives Element).

Sowohl Laverne et al. (2017) [Lav17] als auch Rias et al. (2016) [Ria16] zielen mit ihren Vorgehensmodellen primär auf eine Unterstützung einer AM-spezifischen Bauteilkonzeption und die Generierung von Lösungskonzepten und deren Bewertung unter Berücksichtigung der neuen konstruktiven Freiheiten ab. Basierend auf Fallstudien und Umfragen wird primär opportunistisches Wissen in Bezug auf die konstruktiven Möglichkeiten der additiven Fertigung (z.B. Gitterstrukturen) in der Entwicklungsmethodik berücksichtigt, um die Kreativität bei der Ideengenerierung nicht einzuschränken („design with X“). Lediglich zur Unterstützung der Konzeptauswahl wird rudimentäres restriktives Wissen bereitgestellt („design for X“). Die Wissensbereitstellung erfolgt dabei über ein interaktives Tool [Lav17].

Kamps et al. (2017) [Kam17] entwickeln ein umfassenderes Vorgehensmodell, basierend auf dem erfinderischen Problemlösen (TRIZ) zur Überwindung von Denkbarrieren und einer systematischen Nutzung bionischer Prinzipien mittels additiver Fertigungsverfahren. Die Entwicklungsmethodik integriert unterschiedliche Elemente der Konstruktionsmethodik, Bionik und des DfAM sowie rechnergestützte Optimierungswerkzeuge. Basierend auf einer abstrakten Funktionsbeschreibung, wird die Entwicklung von prinzipiellen Lösungen durch Analogien aus der Bionik unterstützt. Im Anschluss an die Konzeptentwicklung kann zusätzlich bspw. eine Strukturoptimierung durchgeführt werden, bevor das Ergebnis des Entwurfs abschließend auf die Herstellbarkeit anhand bestehender Regelsammlungen geprüft wird.

Kumke et al. (2016/2018) [Kum16; Kum18, 89 ff.] haben eine angepasste Konstruktionsmethodik für additive Fertigungsverfahren entwickelt, welche auf der allgemeinen Richtlinie zum Methodischen Konstruieren, der VDI-Richtlinie 2221 (1993) [VDI93], basiert. Das Vorgehen ist in Abbildung 2.7 dargestellt und umfasst insgesamt zehn übergeordnete Module, die wiederum in Submodule mit spezifischen Methoden und Hilfsmitteln gegliedert sind.



**Abbildung 2.7:** DfAM-Vorgehensmodell, basierend auf VDI-Richtlinie 2221 (1993), entwickelt nach [Kum16; Kum18] (Abbildung basierend auf [Wat16])



Im Vergleich zum Vorgehen nach VDI 2221 [VDI93] sind die Entwurfs- und Ausarbeitungsphase zusammengefasst und eng miteinander verzahnt (siehe Abschnitt 2.1.2). Zudem findet auf Basis der prinzipiellen Lösungen eine Überprüfung der Wirtschaftlichkeit und der technischen Umsetzbarkeit statt, die eine Gliederung in realisierbare Module bzw. Einzelteile erlaubt. Das Vorgehen stellt die Möglichkeiten der Funktionsintegration als separates Modul heraus, welches sowohl in der Bauteilkonzeption als auch der Ausarbeitungs- und Entwurfsphase explizit berücksichtigt wird. Eine weitere Besonderheit des Vorgehensmodells ist die Integration sowohl opportunistischer als auch restriktiver DfAM-Ansätze sowie spezifischer rechnergestützter Methoden, wie die Topologieoptimierung in die einzelnen Module. Auf diese Weise wird dem Produktentwickler eine ganzheitliche methodische Unterstützung mit Berücksichtigung der Besonderheiten der additiven Fertigung gegeben, wobei er phasenspezifisch auf ausgewählte etablierte einzelne DfAM-Ansätze zurückgreifen kann [Kum18, 95 ff.]. Eine Anwendbarkeit des Vorgehensmodells ist sowohl bei Neu- als auch Anpassungskonstruktionen möglich [Kum16].

Weiss et al (2018) [Wei18] haben eine internetbasierte Plattform zur Unterstützung der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile im PEP durch die Bereitstellung von AM-spezifischem Gestaltungs- und Technologiewissen vorgestellt. Die Wissensstrukturierung ist ebenfalls an das allgemeine Vorgehen in der Produktentwicklung nach VDI-Richtlinie 2221 (1993) angelehnt, wobei die Inhalte auf Basis von Umfragen festgelegt wurden. Das implementierte Wissen umfasst sowohl allgemeine Informationen bezüglich unterschiedlicher AM-Technologien, dazugehöriger Nachbearbeitungsschritte und verfügbarer Materialien als auch AM-spezifische Konstruktionsprinzipien und entwicklungsphasenabhängige allgemeine Informationen bspw. zur Funktionsmodellierung.

Speziell zur Entwicklung additiv gefertigter Produkte in Multi-Material-Bauweise haben Yao et al. (2018b) [Yao18b] ein allgemeines Rahmenwerk, bestehend aus vier Modulen, entwickelt. Die Module umfassen die folgenden übergeordneten Schritte: Identifikation funktionaler und technischer Anforderungen (Modul 1), Materialauswahl (Modul 2), Prozessauswahl (Modul 3) und Materialzusammensetzung und Konstruktion der Bauteilgeometrie (Modul 4). Die einzelnen Module sind jeweils in mehrere Einzelaktivitäten und Schritte detailliert, wobei spezifische Hilfsmittel und allgemeine Methoden integriert werden. So bildet bspw. den Ausgangspunkt der Materialauswahl (Modul 2) eine Datenbank, auf deren Basis passende Materialien für die Erfüllung der Anforderungen ausgewählt werden, um anschließend deren Kompatibilität zu prüfen. Dieser Schritt wird durch die Methode des Quality Function Deployment unterstützt, wobei die Prüfung der Materialkompatibilität nicht näher detailliert wird. In Modul 3 wird auf Basis der getroffenen Materialkombination ein passender AM-Prozess ausgewählt und die entsprechenden Gestaltungsregeln für die anschließende Bauteilgestaltung und Nacharbeit festgelegt. In der Bauteilgestaltung werden neben der Geometrie auch der Materialübergang (kontinuierlich oder diskret) sowie die zugehörigen Prozessparameter festgelegt.

### 2.3.3 Opportunistische Ansätze im Design for Additive Manufacturing

Die in dieser Arbeit beschriebenen opportunistischen DfAM-Ansätze konzentrieren sich im Wesentlichen auf Hilfsmittel zur Wissensbereitstellung in Form von Heuristiken und Prinzipien, welche die Entwicklung von Lösungskonzepten und eine Erweiterung des Lösungsraums durch Nutzung AM-spezifischer Potenziale fördern. In Bezug auf die Wissensbereitstellung wird generell die Wichtigkeit des Schritts der Abstraktion und einer funktionsorientierten Wissensbereitstellung in der Entwicklung innovativer Produktdesigns betont [Yan16; Yan18]. Andererseits wird die Notwendigkeit der Wissensbereitstellung zur Unterstützung der Evaluation von Lösungskonzepten im

Hinblick auf eine grundlegende Herstellbarkeit betont, woraus auch eine Einschränkung der Kreativität resultieren kann [Lav17; Yan18]. Im Folgenden werden ausgewählte Ansätze beschrieben.

Allgemein formulierte Gestaltungshinweise zur Unterstützung der Nutzung AM-spezifischer konstruktiver Freiheiten mit Hinblick auf die direkte Herstellung von Endprodukten wurden bereits von Becker et al. (2005) [Bec05] beschrieben. Die abgeleiteten Gestaltungsempfehlungen umfassen neben gestaltspezifischen Hinweisen auch solche, die zum Überdenken der Produktstruktur hinsichtlich einer Integralbauweise anregen sollen. Bin Maidin et al. (2012) [BM12] erarbeiten ein Datenbanksystem zur systematischen Bereitstellung von DfAM-Konstruktionsmerkmalen (engl. design features), welche nach dem Nutzen kategorisiert werden. Insgesamt werden anhand bestehender Anwendungen 106 Konstruktionsmerkmale abgeleitet, die der Individualisierung, Funktionsverbesserung, Funktionsintegration bzw. Integralbauweise und Ästhetik nutzen. Durch einen gezielten Zugriff auf bestimmte Konstruktionsmerkmale ermöglicht das System eine systematische Identifikation geeigneter AM-Potenziale im Hinblick auf eine Neukonzeption bzw. Anpassungskonstruktion. Doubrovski et al. (2012) [Dou12] kritisieren die fehlende Dynamik des Datenbanksystems und entwickeln diesen Ansatz weiter, indem sie ihn auf ein kontinuierlich anpassbares und erweiterbares Wiki-System übertragen.

Blösch-Paidosh et al. (2017/2019) [Blo17; Blo19] haben auf Basis einer Analyse von 275 AM-Anwendungen insgesamt 29 Heuristiken zur Nutzung der konstruktiven Freiheiten additiver Fertigungsverfahren identifiziert. Mit Hilfe der allgemein formulierten Konstruktionshinweise soll primär für unerfahrene Produktentwickler im Kontext der additiven Fertigung eine Umgestaltung bestehender Bauteile unter Berücksichtigung AM-spezifischer Gestaltungsmöglichkeiten erleichtert werden. Weiss et al. (2016) erarbeiten im Vergleich dazu in Anlehnung an Roth [Rot00; Rot01] einen Konstruktionskatalog mit AM-konformen Lösungen, bei denen der Zugriff über allgemeine Funktionen erfolgt. Neben der Funktionsweise des Prinzips ist die Umsetzbarkeit mittels spezifischer AM-Prozesse dargestellt, um die Lösungskonkretisierung zu unterstützen.

Kumke et al. (2017) [Kum17a] leiten auf Basis eines Vergleichs von konventionellen und additiven Fertigungsverfahren sowie der inhärenten Gestaltungsmöglichkeiten von AM 22 Hebel zur Erreichung von insgesamt 27 Nutzenversprechen ab. Die Wissensbereitstellung erfolgt in einem interaktiven Netzwerk bzw. einer Potenzialsystematik, in der die Hebel jeweils mit unterschiedlichen Nutzenversprechen verknüpft sind. Somit wird der Produktentwickler durch das System in der Bauteilumgestaltung bzw. Generierung von Konzepten bei Neukonstruktionen durch eine zielorientierte Identifikation AM-spezifischer konstruktiver Freiheiten wesentlich unterstützt. Zudem wird durch die Anwendung digitaler und physischer Modelle ein Konstruktionsmerkmalbasierter Zugriff auf die Hebel ermöglicht und auf diese Weise die Inspiration gefördert. Der Ansatz wird durch eine Kombination mit bestehenden Kreativitätsmethoden erweitert, sodass eine Einbindung der Hilfsmittel in die Produktentwicklung bzw. Bauteilkonzeption erleichtert wird.

Richter et al. 2017 [Ric17] ordnen hingegen allgemeine AM-Prinzipien auf die unterschiedlichen Handlungsebenen ein (siehe Produktarchitekturgestaltung in Abschnitt 2.1.3), um so einen gezielten Zugriff auf Basis unterschiedlicher Produktmodelle zu gewährleisten. Als Repräsentationsformen werden u.a. die Funktions-, Effekt-, Wirk- und Baustuktur betrachtet, um hierdurch eine Loslösung von fertigungsbedingten Denkbarrieren zu forcieren und gezielt den Lösungsraum durch die Wissensbereitstellung zu erweitern. Die Aufbereitung der Prinzipien erfolgt in Form von Karten, welche zur erleichterten Anwendbarkeit neben einer textuellen Beschreibung des generellen Funktionsprinzips auch potenzielle Anwendungen abbildet. Um darüber hinaus eine zielorien-

tierte Auswahl der Prinzipien in Abhängigkeit des jeweiligen Anwendungsfalls und entsprechen der Anforderungen zu unterstützen, ist der Einfluss des Konstruktionsprinzips auf spezifische Bauteileigenschaften sowie entwicklungs- und fertigungsspezifische Aspekte dargestellt.

Ähnliche Ansätze zur Wissensaufbereitung und -bereitstellung verfolgen Yang et al. (2018) [Yan18], Perez (2018) [Per18] und Perez et al. (2019) [Per19]. Yang et al. (2018) [Yan18] kategorisieren die AM-Prinzipien nach Entwicklungszielen vergleichbar mit Bin Maidin et al. (2012) [BM12], wohingegen Perez (2018) [Per18] eine Einordnung in die Kategorien Produkt, Fertigbarkeit, Entwicklungsprozess und Unternehmensprozess vornimmt und somit übergeordnete wirtschaftliche Faktoren mitbetrachtet. Die von Perez (2018) entwickelten Prinzipienkarten enthalten neben einer textuellen Erläuterung des Nutzens des Prinzips und des zugrundeliegenden AM-Potenzials eine visuelle Beschreibung sowie ein Anwendungsbeispiel. In die Nutzung der Prinzipienkarten ist in ein angepasstes Vorgehen zur Lösungsentwicklung und einer Erweiterung des Lösungsraums integriert, welches die Phasen *Discover*, *Define*, *Develop* und *Deliver* umfasst [Per18].

Zur Integration spezifischer, zeitlich veränderlicher Funktionen mittels Formgedächtnislegierungen (engl. shape memory alloys, SMA) haben Oberhofer et al. (2019) [Obe19] zudem einen matrixbasierten Ansatz entwickelt, der die Konzeption und den Entwurf additiv gefertigter passiver flexibler Strukturen mit integrierten SMA unterstützt. Die Matrix zeigt Interaktionen zwischen den Eigenschaften der MEX und der SMA, sodass hieraus Regeln für den Entwurf und die Gestaltung mittels SMA verformter flexibler Strukturen abgeleitet werden können.

### 2.3.4 Restriktive Ansätze im Design for Additive Manufacturing

Die restriktiven Ansätze unterstützen den Produktentwickler primär in der Entwurfs- und Ausarbeitungsphase, um fertigungstechnische Grenzen und Limitierungen bei der Bauteilgestaltung mit einzubeziehen. Der Fokus liegt also auf der Gewährleistung der Herstellbarkeit und nicht im Ausschöpfen der konstruktiven Freiheiten [Zhu17a]. Eine Vielzahl wissenschaftlicher Studien befasst sich mit der Ermittlung qualitativer und quantitativer Konstruktionsempfehlungen für die unterschiedlichen AM-Technologien. Nachfolgend wird ein knapper Überblick über ausgewählte Regelsammlungen speziell für das Verfahren der Materialextrusion gegeben.

Primär sind die entwickelten Gestaltungsregeln an Geometrielemente geknüpft, wobei auch spezifische AM-Potenziale, wie die Fertigung beweglicher Baugruppen ohne zusätzlichen Montageprozess, in den Regelsammlungen Beachtung finden [Ada15; Hoc08]. Nachgelagerte Prozesse (siehe Abschnitt 2.2.3) werden ebenfalls in den Konstruktionsregeln betrachtet, indem bspw. Zugänglichkeiten für die Entfernung von Stützmaterial oder ein Aufmaß für Oberflächenbearbeitungen vorgesehen werden müssen [Ada15]. Als ein wesentlicher Einflussfaktor auf die resultierenden mechanisch-technologischen Bauteileigenschaften, Auflösungsgrenzen, das Benötigen von Stützstrukturen sowie die resultierende Oberflächengüte wird die Bauteilorientierung in den Gestaltungsregeln explizit berücksichtigt [Ada15; Hoc08; Kir11]. Speziell zur Unterstützung unerfahrener Konstrukteure in Bezug auf die additive Fertigung wurde ein sogenanntes „DfAM Worksheet“ entwickelt, welches neben qualitativen Konstruktionsempfehlungen zur Vermeidung von Fertigungsfehlern auch eine generelle Eignung des Bauteils für additive Fertigungsverfahren auf der Basis von Konstruktionsmerkmalen bewertet [Boo17]. Cuellar et al. (2018) [Cue18] entwickeln zudem Richtlinien für integrale, bewegliche Baugruppen mit Fokus auf die Gestaltung integrierter Federelemente und Gelenke.

Da die angegebenen quantitativen Grenzwerte für spezifische Konstruktionsmerkmale oder resultierende Oberflächenrauheit stark von den gewählten Prozessparametern wie auch der Anlagenkonfiguration abhängen, ist deren Verallgemeinerung häufig schwierig, sodass sie eher als Richtwerte anzusehen sind. Daher fließen die Ergebnisse einzelner wissenschaftlicher Studien in bestehende verfahrensspezifische Richtlinien [VDI15; VDI19] mit ein. Zur individuellen Ermittlung material- und maschinenspezifischer Grenzwerte für bestimmte Konstruktionsmerkmale haben sich zudem mittlerweile standardisierte Prüfkörper etabliert [DIN18c]. Darüber hinaus streben aktuelle Forschungsarbeiten eine Verknüpfung zwischen konstruktionstechnischen und prozessspezifischen Variablen an, um in den Gestaltungsregeln den Prozesseinfluss und Restriktionen wie Stützstrukturen mit abbilden zu können [Kim18]. Hierdurch wird eine effektive Kopplung zwischen Konstruktion und Fertigung realisiert und so potenzielle Iterationen reduziert.

## 2.4 Konkretisierung des Forschungsbedarfs

Auf Grundlage der in Abschnitt 2.3 vorgestellten DfAM-Ansätze lässt sich der Forschungsbedarf im Hinblick auf die Zielsetzung dieser Arbeit konkretisieren und die in Abschnitt 1.3 formulierten Forschungsfragen detaillieren. Tabelle 2.3 fasst die beschriebenen Ansätze, gegliedert nach den gewählten Oberkategorien, zusammen. Neben einer Einordnung in die Konstruktionsphasen nach VDI-Richtlinie 2221 (1993) [VDI93] wird insbesondere die Berücksichtigung der AM-Potenziale im Hinblick auf Funktionsintegration und die MMAM analysiert. Die Bewertung erfolgt nach einem dreistufigen System nach der Abstufung vollständige (●), teilweise (◐) und keine Betrachtung bzw. Berücksichtigung der Merkmale. Zudem ist der Fokus des Ansatzes aufgeführt, um dessen Einordnung in den Kontext der MMAM zu erleichtern.

Generell ist zu erkennen, dass das Potenzial der Funktionsintegration bzw. Integralbauweise in vielen der bestehenden DfAM-Ansätze umfassend berücksichtigt wird, wohingegen die konstruktiven Freiheiten der MMAM lediglich vereinzelt und nicht vollständig, sondern allgemein betrachtet werden. Eine explizite Betrachtung der Besonderheiten der MMAM in der Produktentwicklung wird nur von Yao et al. (2018b) [Yao18b] durchgeführt, wobei das entwickelte Vorgehensmodell einen generellen Rahmen vorgibt, ohne spezifische Schritte wie die Charakterisierung des Schichtverbunds zur Prüfung der Materialkompatibilität oder spezifische Lösungsprinzipien zu detaillieren.

Da eine Anwendung der konstruktiven Möglichkeiten der MMAM in der Regel mit einer Prinzipvariation einhergeht, ist ein Überdenken der Systemarchitektur zwingend erforderlich. Ein funktionsorientierter Ansatz unterstützt hierbei einen systematischen Zugriff auf die MMAM-spezifischen Konstruktionsprinzipien und erleichtert eine frühzeitige Berücksichtigung in der Produktentwicklung bei deren Anwendung [Ric18; Pra18a; Yan16; Yan18]. Eine möglichst breite und funktionsorientierte Anwendung der AM-Potenziale wird grundsätzlich in einigen Ansätzen durch die Verwendung abstrakter Produktmodelle (u.a. Funktionsstrukturen) angestrebt, um hieraus eine Erweiterung des Lösungsraums zu erreichen [Boy14; Lav17; Ria16; Wei16; Yan15b; Yan18], wobei allerdings nur z.T. eine Einbettung der Ansätze in bestehende Produktentwicklungsprozesse berücksichtigt wird [Kum16; Kum18; Wei18].

Die in den opportunistischen Ansätzen bereitgestellten Konstruktionsprinzipien und Heuristiken thematisieren zwar in Teilen die gestalterische Freiheit diskreter oder kontinuierlicher Materialübergänge zur Integration zusätzlicher Funktionen bzw. einer Funktionserweiterung [Kum17a; Blo17; Blo19; Per18; Per19; Yan18], allerdings sind die potenziell integrierbaren Funktionen nicht

spezifiziert und die entsprechenden AM-Prinzipien aufgrund des geringen Detailgrads nur schwer anzuwenden. Insbesondere Konstrukteure ohne spezifisches Vorwissen im Bereich der additiven Fertigung werden so nur unzureichend in Bezug auf die Berücksichtigung der Potenziale des MMAM in der Generierung prinzipieller Lösungen unterstützt und die Auswahl von Lösungskonzepten aufgrund der geringen Bereitstellung von spezifischem restriktiven Wissen deutlich erschwert. Auch aus einer Übersicht verfügbarer Materialien (siehe [Wei18; Yao18b]) lassen sich nicht unmittelbar konstruktive Möglichkeiten in Bezug auf eine Funktionsintegration mittels MMAM ableiten.

**Tabelle 2.3:** Tabellarische Einordnung der vorgestellten DfAM-Ansätze in die einzelnen Konstruktionsphasen und Bewertung hinsichtlich einer expliziten Berücksichtigung von Möglichkeiten zur Funktionsintegration und der Besonderheiten von MMAM aufbauend auf [Kum16]

	Konstruktionsphase				Funktions- integration	Besonderhei- ten MMAM	Fokus
	I	II	III	IV			
<b>Kombinierte Ansätze</b>	Boyard et al. [Boy14]	○	○		●		Funktionsintegration
	Kamps et al. [Kam17]	○	●	●	○		Bionische Prinzipien
	Kumke [Kum16; Kum18]	○	●	●	○	○	Allg. Vorgehensmodell
	Laverne et al. [Lav17]		●		○		Ideengenerierung
	Rias et al. [Ria16]		●		○		Ideengenerierung
	Weiss et al. [Wei18]	○	○	○	○		Allg. Vorgehensmodell
	Yang et al. [Yan15a] / Yang und Zhao [Yan15b]		○	○	●		Vorgehensmodell zur Integralbauweise
	Yao et al. [Yao18a]	○	○	○	○	○	Allg. Vorgehensmodell
<b>Opportunistische Ansätze</b>	Becker et al. [Bec05]		●	●	○		Gestaltungshinweise
	Bin Maidin et al. [BM12] / Dobrovski et al. [Dou12]	○	●	○	○		allg. AM-Konstruktions- merkmale
	Blösch-Paidosh et al. [Blo17; Blo19]	○	●		○	○	allg. AM-Prinzipien/ Heuristiken
	Kumke et al. [Kum17a]	○	●		○	○	allg. AM-Prinzipien
	Weiss et al. [Wei16]		●	○	○		allg. AM-Prinzipien
	Oberhofer et al. [Obe19]		●	○		○	Prinzipien zur Integra- tion von SMA
	Perez et al. [Per19] / Perez [Per18]	○	●	○	○	○	allg. AM-Prinzipien
	Richter et al. [Ric17]	○	●	○	○		allg. AM-Prinzipien
	Yang et al. [Yan18]	○	●		○	○	allg. AM-Prinzipien
<b>Restriktive Ansätze</b>	Adam [Ada15]			●	○		geometriespez. Regeln
	Booth et al. [Boo17]		○	●	○		Verständnis v. Grenzen
	Cuellar et al. [Cue18]		○	●	○	●	Regeln für integrierte Gelenke und Federn
	DIN 52902 [DIN18c]			●	○		Testkörper
	HS Bremen [Hoc08]			●	○		geometriespez. Regeln
	Kim et al. [Kim18]			●	○		Erweiterung um pro- zessspez. Einflussfakt.
	Kirchner [Kir11]						verfahrensspez. Regeln
	VDI 3405 Blatt 3 [VDI15]			●	○		geometriespez. Regeln
	VDI 3405 Blatt 3.4 (Materi- alextrusion) [VDI19]			●	○		verfahrensspez. Regeln für die MEX

● vollständige Betrachtung/Berücksichtigung; ○ teilweise Betrachtung/Berücksichtigung

Zur erweiterten Führung des Konstrukteurs in der Ideengenerierung und der Förderung zur Entwicklung realistischer Lösungskonzepte ist eine Betrachtung der Schichtverbundgestaltung bzw.

Materialkompatibilität essentiell [Vae13]. Zur Ausschöpfung der konstruktiven Potenziale von AM ist zudem eine prinzipispezifische Betrachtung prozessseitiger Entwurfsvariablen im Hinblick auf eine lokale Variation von z.B. mechanisch-technologischen oder elektrischen Eigenschaften erforderlich. Lediglich Oberhofer et al. (2019) [Obe19] berücksichtigen material- und prozessspezifische Interaktionen, wohingegen Kumke et al. (2017) [Kum17a] umfassend die AM-Potenziale primär in Bezug auf geometrische Konstruktionsmerkmale analysieren. Die restriktiven Ansätze und verfügbaren Regelsammlungen thematisieren die MMAM derzeit noch nicht und beschränken sich primär auf Geometriemerkmale [Ada15; Hoc08; Kir11; VDI19] oder die Fertigung beweglicher Baugruppen [Cue18] im Hinblick auf Spaltmaße und Stützstrukturen. Prüfkörper zur Charakterisierung von Schichtverbünden für die MMM oder Regeln zur Gestaltung des Schichtverbunds bzw. AM-spezifischer konstruktiver Möglichkeiten existieren hingegen nicht.

Zusammenfassend lassen sich folgende Limitierungen der bestehenden Ansätze in Bezug auf die Berücksichtigung der methodischen Unterstützung in der Konstruktion additiv gefertigter Multi-Material-Bauweisen mittels Materialextrusion zur Detaillierung der Forschungsfragen festhalten:

- Generierung von *Lösungskonzepten* unter Berücksichtigung geometrie- und prozessspezifischer konstruktiver Möglichkeiten der Multi-Material-Materialextrusion: Eine Berücksichtigung der spezifischen Gestaltungsfreiheiten der MMM ist durch deren unzureichende Betrachtung in bestehenden DfAM-Ansätzen und AM-spezifischen Konstruktionsprinzipien kaum möglich. Zudem fehlt eine Verknüpfung geometrie- und prozessspezifischer Stellhebel im Hinblick auf prinzipienbezogene Bauteileigenschaften. Aufgrund der unzureichenden Wissensbereitstellung in Bezug auf prozesstechnische Grenzen wie die Materialkompatibilität wird die Anwendbarkeit und somit die Bewertung prinzipieller Lösungen bzw. die Entwicklung realistischer Lösungskonzepte besonders für unerfahrene Produktentwickler im Kontext der MMAM erschwert.
- Methodische Unterstützung in der *Schichtverbundgestaltung*: Die Auswahl und Konkretisierung von Lösungskonzepten ist ohne eine explizite Betrachtung der Materialkompatibilität als notwendige Voraussetzung für die Umsetzbarkeit von MMB kaum möglich. Eine Unterstützung durch Prüfkörper zur Charakterisierung der Materialkompatibilität bzw. Verbundfestigkeit sowie zur Identifikation material- und prozessspezifischer Einflussfaktoren sind für die MMM allerdings nicht verfügbar. Weiterhin mangelt es an Gestaltungsempfehlungen für die Schichtverbundgestaltung unter Berücksichtigung der konstruktiven Potenziale der MMM.
- Effektive Führung des Produktentwicklers in den Phasen des Konzipierens und Entwerfens durch *systematische Wissensbereitstellung*: Die Komplexität und Besonderheiten der MMAM macht eine spezielle Unterstützung des Produktentwicklers sowie eine gezielte Führung durch eine multimediale und geführte Wissensbereitstellung erforderlich, um eine realistische Konzeptentwicklung zu forcieren. Diese wird durch bestehende Ansätze nicht bzw. kaum gewährleistet. Für die Generierung innovativer Lösungskonzepte unter Ausnutzung der Potenziale der MMM ist zudem ein funktionsbasierter Zugriff auf das Produktwissen und eine Einbettung in den PEP notwendig, welche in einer Vielzahl der isolierten opportunistischen Ansätze nicht berücksichtigt wird.

### 3 METHODISCHER ANSATZ

In diesem Abschnitt wird der methodische Ansatz zur Erreichung der eingangs benannten Zielsetzung (Abschnitt 1.3) beschrieben und der herausgestellte Forschungsbedarf (Abschnitt 2.4) in Form von Forschungsfragen spezifiziert. Hierauf aufbauend wird der in dieser Arbeit gewählte methodische Ansatz zur Beantwortung der Forschungsfragen erläutert und die Randbedingungen als Prämissen formuliert.

#### 3.1 Zielsetzung und Prämissen

Das Ziel der Arbeit bilden sowohl die Konzeption und der Aufbau eines Wissenssystems als auch die Identifikation, Erarbeitung und Aufbereitung von Gestaltungs- und Technologiewissen. Dieses Wissen soll speziell zur Unterstützung der Entwicklung prinzipieller Lösungen sowie deren Auswahl und Konkretisierung für mittels Materialextrusion hergestellte Multi-Material-Bauweisen dienen. Die *Zielstellung* gliedert sich in folgende Unterpunkte:

- *Wissensidentifikation* in Bezug auf Prinzipien der MMM und damit einhergehender konstruktiver Potenziale für die Produktgestaltung,
- *Wissensaufbereitung* im Hinblick auf die Besonderheiten der MMM und Betrachtung geometrie-, material- und prozessspezifischer (opportunistischer und restriktiver) Stellhebel zur Konkretisierung prinzipieller Lösungen,
- *Wissensbereitstellung* zur Nutzbarmachung und Führung des Anwenders innerhalb des Produktentwicklungsprozesses.

Als Grundlage für die Ableitung der Forschungsfragen und einer Eingrenzung der zu entwickelnden Inhalte der Methodik werden Randbedingungen in Form von *Prämissen* postuliert:

- Das erarbeitete Gestaltungs- und Technologiewissen ist spezifisch für das additive Fertigungsverfahren der Materialextrusion, sodass eine Übertragbarkeit auf weitere additive Verfahren nicht uneingeschränkt möglich ist.
- Die Methodik betrachtet die Besonderheiten der Multi-Material-Materialextrusion, wobei der generische Ansatz der Methodik einen Transfer auf andere Multi-Material-fähige additive Fertigungsverfahren mit prozessspezifischen Anpassungen zulässt.
- Die Methodik fokussiert die Schritte der Lösungsfindung und Lösungsraumerweiterung unter Berücksichtigung der neuen Gestaltungsfreiheiten der MMM mit einer grundsätzlichen Betrachtung fertigungstechnischer Aspekte im Hinblick auf eine technische Umsetzbarkeit. Sie weist daher primär einen qualitativen Charakter auf, welcher auf das Generieren sinnvoller bzw. geeigneter Lösungen und nicht auf das Erreichen optimaler Lösungen abzielt.

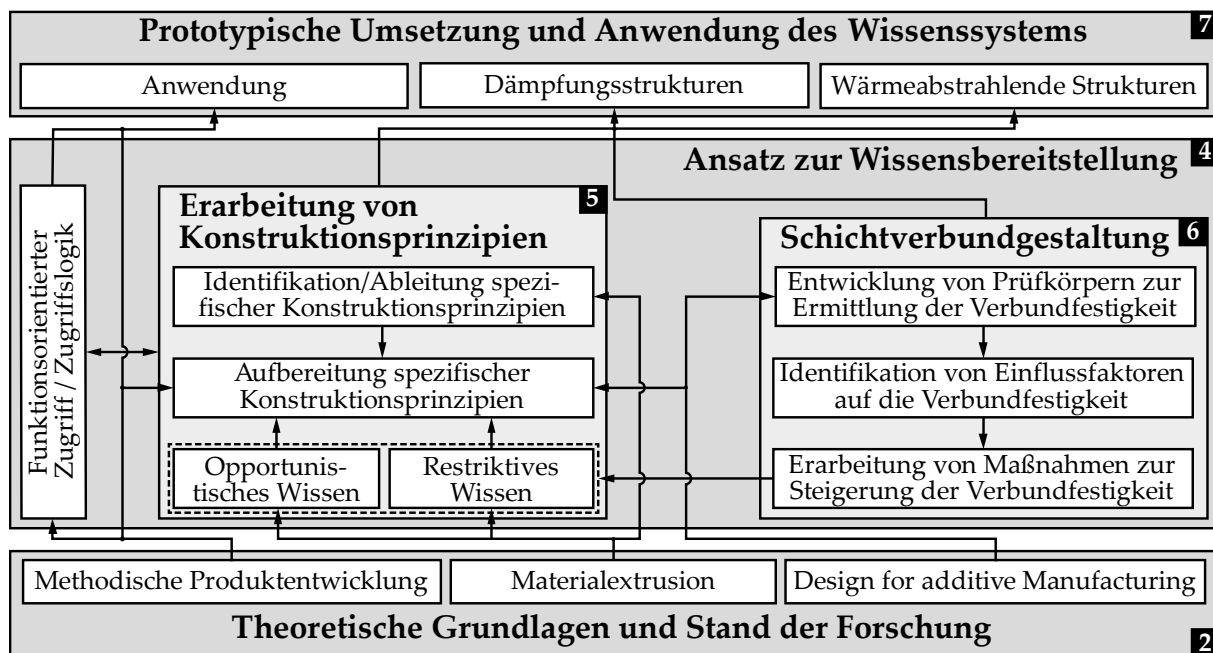
#### 3.2 Forschungsfragen und Lösungsansatz

Unter Einbeziehung der in Abschnitt 3.1 genannten Prämissen ergeben sich auf Basis der Zielsetzung folgende *Forschungsfragen*, die im Rahmen dieser Arbeit thematisiert werden:

1. Welche konstruktiven Möglichkeiten bietet die MMM und wie können diese ermittelt werden?

2. In welcher Form müssen die Konstruktionsprinzipien aufbereitet werden, um die Generierung prinzipieller Lösungen wie auch die Auswahl und Konkretisierung von Lösungskonzepten unter Berücksichtigung von Konstruktionszielen und genereller verfahrenstechnischer Potenziale und Grenzen (Gestaltungs- und Technologiewissen) zu unterstützen?
3. Auf welche Art und Weise kann eine anwendungsspezifische und funktionsorientierte systematische Wissensbereitstellung für die MMM erfolgen, um eine effektive Führung des Produktentwicklers während der Schritte der Entwicklung von Lösungskonzepten sowie eine Einbettung in den allgemeinen Produktentwicklungsprozess zu ermöglichen?

Der gewählte methodische Ansatz zur Beantwortung der Forschungsfragen ist in Abbildung 3.1 dargestellt und wird nachfolgend kurz beschrieben.



**Abbildung 3.1:** Darstellung des in der Arbeit gewählten Lösungsansatzes zur Beantwortung der Forschungsfragen

Die Wissensbereitstellung spielt in Bezug auf die Nutzung der Gestaltungsmöglichkeiten der MMM innerhalb verfahrenstechnischer Grenzen eine zentrale Rolle in der Generierung von prinzipiellen Lösungen sowie deren Auswahl und Konkretisierung durch eine Verknüpfung von Gestaltungs- und Technologiewissen [Lav17; Lin16; Pra18b; Tho16]. Auf der Basis der theoretischen Grundlagen und des Stands der Forschung (Kapitel 2) werden in Kapitel 4 Anforderungen an die systematische Wissensbereitstellung und -aufbereitung von spezifischen Konstruktionsprinzipien definiert. Das Ergebnis bildet das Konzept eines Systems zur Wissensbereitstellung mit entsprechender Zugriffslogik und festgelegten Inhalten, welche in den nachfolgenden Kapiteln 5 bis 7 erarbeitet und detailliert werden. Die Inhalte des Wissenssystems gliedern sich einerseits in Konstruktionsprinzipien, die mit opportunistischem und restriktivem Wissen verknüpft sind, und andererseits in Prüfkörper und Regeln zur Schichtverbundgestaltung, die als wesentliche Voraussetzung für die technische Realisierung von MMB angesehen werden [Vae13]. Die Identifikation bzw. Ableitung von Konstruktionsprinzipien erfolgt durch eine Analyse bestehender Anwendungen im Bereich der MMM [Blo17; Blo19; Yil10], verfügbarer Materialien und deren Eigenschaften [Ash04] sowie detaillierter experimenteller Untersuchungen. Bei der Wissensaufbereitung und Strukturierung werden sowohl konstruktionsmethodische als auch AM-spezifische Anforderungen berücksichtigt [Ful16; Ink16; Jan91; Kir11; Kle16; Lav17; Per18; Pra18b; Rot00; Rot01; Yan18].



Zur spezifischen Unterstützung der Lösungskongretisierung und -auswahl werden in Kapitel 6 Prüfkörper zur Ermittlung belastungsabhängiger Verbundfestigkeiten entwickelt, welche eine Identifikation von Einflussfaktoren auf die Verbundfestigkeit unter Berücksichtigung material-, geometrie- und prozessspezifischer Parameter erlauben wie auch die Entwicklung von Maßnahmen zu dessen Steigerung ermöglichen. Die hieraus abgeleiteten qualitativen Regeln helfen dem Produktentwickler in der Entwicklung realistischer Lösungskonzepte im Kontext der MMM.

Als Evaluation der systematischen Bereitstellung von AM-Konstruktionsprinzipien und der Berücksichtigung AM-spezifischer konstruktiver Möglichkeiten in der Generierung von Lösungskonzepten wird der Ansatz zur Wissensbereitstellung innerhalb von Workshops im industriellen sowie akademischen Kontext untersucht (Abschnitt 5.4). Die Wissensrepräsentation innerhalb der Workshops erfolgt durch sogenannte Prinzipienkarten und ist nicht auf die MMM beschränkt. Diese Untersuchungen dienen vorrangig der Evaluation des methodischen Ansatzes in der systematischen Wissensbereitstellung in Bezug auf AM-Potenziale sowie der Einbettung in den Produktentwicklungsprozess. In der Evaluation werden primär die Schritte der Abstraktion zur Überwindung von Denkbarrieren, der Wissenszugriff über Konstruktionsziele und Funktionen und die Bereitstellung von opportunistischem bzw. restriktivem Wissen als wesentliche Elemente des methodischen Ansatzes fokussiert.

Die Erarbeitung von Inhalten für das Wissenssystem speziell für die MMM erfolgt anhand von zwei prototypischen Anwendungen auf der Basis von experimentellen Untersuchungen. Zum einen werden Potenziale der MMM im Hinblick auf die Integration passiver Dämpfungsstrukturen mittels Methode der Akustischen Schwarzen Löcher untersucht (Abschnitt 7.1) und zum anderen wird die Gestaltung und Integration wärmeerzeugender Strukturen erforscht (Abschnitt 7.2). Aufbauend auf der Demonstration der technischen Realisierbarkeit der exemplarischen Anwendungen können anschließend Erkenntnisse im Hinblick auf die Anwendbarkeit des Wissenssystems und einer zukünftigen Erweiterung in Bezug auf spezifische Wissensinhalte abgeleitet werden. Eine prototypische Umsetzung des Wissenssystems in Form einer Graphendatenbank wird in Abschnitt 7.3 zusammen mit dessen Anwendung am Beispiel der Umgestaltung einer Handprothese beschrieben.



## 4 ENTWICKLUNG EINES ANSATZES ZUR WISSENSBEREITSTELLUNG

Aufbauend auf die Kapitel 2 und 3 wird hier ein Ansatz zur Wissensbereitstellung als Unterstützung der Ideengenerierung und Erweiterung des Lösungsraums in Bezug auf die konstruktiven Potenziale der MMM vorgestellt. Hierzu werden zunächst Anforderungen an die Wissensbereitstellung in Bezug auf allgemeine und konstruktionsmethodische Aspekte sowie technologiespezifische Randbedingungen aufgestellt (Abschnitt 4.1). Anschließend werden in Abschnitt 4.2 die Struktur und Inhalte des Wissenssystems samt Zugriffslogik definiert.

### 4.1 Aufstellen von Anforderungen an das zu entwickelnde Wissenssystem

Der Einsatz neuer bzw. die Weiterentwicklung bestehender Fertigungstechnologien wirkt sich aufgrund geänderter Fertigungsrandbedingungen direkt auf die Produktentwicklung aus [Lin16]. Zur generellen Berücksichtigung sowie gezielten Nutzung des sich bietenden Potenzials der additiven Fertigung und speziell deren Multi-Material-Fähigkeit bedarf es daher neuer Konstruktionsansätze, auch in Bezug auf die Wissensbereitstellung. In der Entwicklung neuartiger, innovativer Lösungskonzepte wird der Lösungsraum maßgeblich durch zwei Faktoren bestimmt: das verfügbare Wissen [Hat03; And15, 146; Yan18] und bestehende Vorfixierungen [Jan91]. Zentrale Herausforderungen in der Entwicklung eines Wissenssystems zur Unterstützung der Bauteilkonzeption bestehen demnach in der Wissensidentifikation sowie dessen Speicherung und Aufbereitung, um hierdurch eine möglichst breite Anwendung der neuen Gestaltungsfreiheiten zu erreichen [Ric18; VDI82; VDI97]. Neben dem Auffinden benötigter Informationen und deren Repräsentation soll ein Wissenssystem zudem das Treffen von Entscheidungen unterstützen [Kir11, 62].

Das in dieser Arbeit zu entwickelnde System zur Wissensbereitstellung soll primär die Generierung von prinzipiellen Lösungen fördern und somit die Erweiterung von Lösungsräumen durch Betrachtung der hinzugewonnenen Gestaltungsmöglichkeiten der MMM erleichtern. Demnach sollen vorrangig die Schritte des *Suchens nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen*, des *Gliederns in realisierbare Module* und die *generelle Bewertung der technischen Machbarkeit* innerhalb des Produktentwicklungsprozesses unterstützt werden (Abbildung 2.7). Die Eignung der zunächst im Rahmen der Lösungssuche identifizierten *Lösungsideen* ist dabei noch nicht in Bezug auf die Anforderungen abgesichert [Lin09, 333]. Deshalb ist eine Unterstützung bei der Konkretisierung von Lösungsideen im Hinblick auf die Entwicklung von prinzipiellen Lösungen sowie die Auswahl von Lösungskonzepten erforderlich. Diese *prinzipiellen Lösungen* berücksichtigen bereits eine grundsätzliche technische Umsetzbarkeit, ohne jedoch Geometriemerkmale detailliert festzulegen [VDI97]. Die Auswahl einer prinzipiellen Lösung, welche die Funktionsanforderungen am wahrscheinlichsten erfüllt, stellt schließlich das *Lösungskonzept* dar [Lin09, 333]. Dies bildet wiederum die Grundlage für die Konkretisierung des Lösungskonzepts im Hinblick auf grundlegende Festlegungen geometrischer und stofflicher Merkmale unter Einbeziehung von Effekten sowie deren Anordnung und Zusammenhänge [VDI82; VDI97].

In den nachfolgenden Abschnitten 4.1.1 und 4.1.2 werden in Bezug auf die drei Oberkategorien der Wissensidentifikation, -aufbereitung und -nutzung Anforderungen an das Wissenssystem ermittelt, welche als Grundlage für dessen Aufbau dienen.

#### 4.1.1 Auffinden benötigter Informationen

Die Entwicklung innovativer (Bauteil-)Konzepte unter Berücksichtigung technologiespezifischer konstruktiver Freiheiten erfordert ein Umdenken des Produktentwicklers hin zu einer Prinzipvariation, da eine Variation bzw. Optimierung der Produktgestalt oft nur eine partielle Nutzung der Gestaltungsmöglichkeiten bietet [Alb15; Kum17a; See14]. Als Grundlage für die Ermittlung alternativer Lösungsprinzipien, das Überwinden von Denkbarrieren und die Förderung der Kreativität in der Produktentwicklung haben sich die Abstraktion und Untergliederung der technischen Problemstellung etabliert [Lin16, 743 ff.; Pah07, 127 ff.]. Die Basis hierfür bilden die Funktionsmodellierung und die Produktarchitektur. Letztere bietet einen Ausgangspunkt für die Anwendung einer Vielzahl von Methoden und Konstruktionsprinzipien, u.a. zur Funktionsintegration, wobei das verfügbare Gestaltungs- und Technologiewissen den Lösungsraum in der Produktarchitekturgestaltung bestimmt [Ric16]. Ein systematischer Zugriff von Konstruktionsprinzipien sollte im Kontext der additiven Fertigung funktionsorientiert erfolgen, um die Generierung neuartiger Lösungskonzepte zu forcieren und u.a. das Potenzial der MMM nutzbar zu machen [Ric16; Wei16; Yan16; Yan18]. Um eine kontextunabhängige Anwendung und einen funktionsorientierten Zugriff auf die Konstruktionsprinzipien zu ermöglichen, ist eine Systematisierung bzw. Vereinheitlichung der Funktionsmodellierung notwendig [Kir11, 56; Pah07, 248; Rot00, 82 f.; Sto99; Val18; VDI82; VDI97]. Stone und Wood (1999) haben auf der Grundlage unterschiedlicher Ansätze zur Klassifizierung von Funktionen eine Vereinheitlichung durchgeführt. Die Basisfunktionen (functional basis) umfassen drei allgemeine Größen, acht Funktionsklassen und 32 Operationen [Sto99].

Gleichzeitig sollte der Abstraktionsgrad der Prinzipienbeschreibung so gewählt werden, dass eine praktische Anwendbarkeit ermöglicht wird, gleichzeitig die Anzahl der Prinzipien beherrschbar im Sinne eines gezielten Zugriffs bleibt [Ink16, 86; VW02, 67]. Im Einzelfall kann durch den allgemeinen Charakter der Funktionsbeschreibung die Lösungssuche erschwert werden, sodass eine aufgabenbezogene Spezifizierung von Begriffen sinnvoll ist [Pah07, 248]. Zudem sollte das aufgaben- und benutzerspezifische Auffinden relevanter Informationen durch entsprechende Filter- und Sortierfunktionen unterstützt werden [Kir11, 58; Wei18] wie auch eine Erweiterbarkeit in Bezug auf technologische Entwicklungen und die daraus resultierenden geänderten Gestaltungsmöglichkeiten gewährleistet sein [Kir11, 60 f.]. Zur gezielten Führung innerhalb der Bauteilkonzeption ist darüber hinaus aufgrund der Menge an Informationen und der Komplexität der Zusammenhänge eine Verknüpfung dieser Elemente notwendig [Pra18a; Rie12, 457 ff.; Wei18; Yan18].

Somit lassen sich folgende Forderungen an das System in Bezug auf die Wissensidentifikation bzw. das Auffinden von Informationen ableiten:

- Einbettung der Wissensbereitstellung in den Produktentwicklungsprozess auf Basis etablierter Produktmodelle bzw. Repräsentationsformen durch das Ermöglichen eines systematischen, funktionsorientierten Informationszugriffs
- Gewährleistung einer breiten und kontextunabhängigen Anwendung des bereitgestellten Wissens und Vermeidung von Vorfixierungen durch geeignete Wahl des Abstraktionsgrads
- Führung des Anwenders in der Generierung, Auswahl und Konkretisierung prinzipieller Lösungen zur Beherrschung der Komplexität des bereitgestellten Wissens durch Verknüpfungen der enthaltenen Informationen sowie Filter- und Sortierfunktionen
- Sicherstellung der Erweiterbarkeit und Aktualität der bereitgestellten Informationen in Bezug auf technologische Neu- bzw. Weiterentwicklungen

#### 4.1.2 Repräsentation der Informationen und Entscheidungsunterstützung

Die Repräsentation der Informationen sollte generell so gestaltet sein, dass ein Zugriff auf potenzielle Lösungen bzw. Objekte über unterschiedliche Eigenschaften und Kennwerte ermöglicht wird [Kir11, 58]. Als wesentliche Informationen innerhalb eines Systems zur Wissensbereitstellung im Kontext des DfAM werden u.a. Beispiele für Konstruktionsprinzipien und spezifische Gestaltungsregeln angesehen [Wei18]. Die Beschreibung der Konstruktionsprinzipien umfasst im allgemeinen Informationen in Bezug auf die grundsätzliche Umsetzung einer oder mehrerer Funktionen, den eingesetzten physikalischen Effekt wie auch geometrische und stoffliche Merkmale [VDI18a]. Die Bereitstellung der Prinzipien sollte zudem neben der Zuordnung zu Gestaltungszielen und dem Nutzen sowie der Einordnung in einen Anwendungskontext grundsätzlich auch Empfehlungen zur technischen Umsetzbarkeit berücksichtigen [Per18, 82 f.; Pra18b] (siehe auch Abschnitt 2.1.4). Für die MMM bedeutet dies einerseits eine Bereitstellung von Wissen in Bezug auf geometrie- und prozessspezifische Potenziale bzw. Grenzen (u.a. [Kim18; Kum17a]) sowie andererseits im Hinblick auf die Materialkompatibilität und Schichtverbundgestaltung [Fis18; Vae13]. Die Art des bereitgestellten Wissens ist dabei von der jeweiligen Aktivität innerhalb des PEP abhängig, da bspw. in der initialen Generierung von prinzipiellen Lösungen andere Informationen benötigt werden als in deren Konkretisierung oder zur abschließenden Konzeptauswahl.

Um die Entwicklung alternativer Lösungskonzepte zu forcieren und die Kreativität möglichst nicht einzuschränken, sollten in diesem Schritt primär Informationen über die konstruktiven Möglichkeiten additiver Fertigungsverfahren betrachtet werden, wobei einzelne Autoren eine komplette Loslösung von fertigungstechnischen Restriktionen und fertigungsbedingten Denkbarrieren postulieren [Lav17; Yan18]. Im Gegensatz hierzu wird zur Unterstützung der Designsynthese und der Generierung technisch realistischer bzw. realisierbarer Konzepte die Bereitstellung allgemeiner Informationen über prozessspezifische Grenzen und Restriktionen gefordert [Pra18a; Yan16; Zhu17a]. Die Wissensaufbereitung kann generell in Form von Videos, Bildern, Gegenständen oder Text erfolgen, wobei sich bei Untersuchungen im Kontext der additiven Fertigung v.a. die ersten drei Repräsentationsformen als zielführend herausgestellt haben [Lav17]. Textuelle Beschreibungen erleichtern das Verständnis der Informationen und regen zudem die Kreativität an, wobei diese ebenfalls durch abstrahierte, visuelle Informationen, z.B. Funktionsweisen, wie auch reale Anwendungsbeispiele und Anschauungsobjekte gefördert werden. Um Vorfixierungen durch derartige Illustrationen zu vermeiden, sollten verschiedene Beispiele aufgeführt werden [Per18; Pra18b]. Innerhalb der Lösungskonkretisierung, also den Schritten der Lösungskonzeptentwicklung und Gestaltung der Produktarchitektur, nimmt der Bedarf an qualitativen und quantitativen Merkmalen bzw. Bewertungskriterien in Bezug auf Material- und Prozesseigenschaften sowie Gestaltungsmöglichkeiten und -grenzen zu, um eine Beurteilung des Anwendungsbereichs der Prinzipien bzw. des Wissens im Hinblick auf die jeweilige technische Problemstellung zu ermöglichen [Lav17; Pra18b; Ink16, 86 f.]. Vor allem im Kontext der MMM sind Informationen über die Materialkompatibilität und die Schichtverbundgestaltung im Hinblick auf die Entwicklung technisch realisierbarer Lösungskonzepte unverzichtbar [Fis18; Vae13].

In der Definition von Lösungsräumen und dem Treffen komplexer Entscheidungen spielt die Unterstützung des Produktentwicklers eine zentrale Rolle, da zwischen Anforderungen und Lösungsparametern Zielkonflikte auftreten können, die gelöst werden müssen [Kir11, 59; Tue16, 84 f.]. Je nach Aktivität innerhalb der Produktentwicklung können die Kriterien in qualitativer oder quantitativer Form vorliegen, wobei eine hinreichende Anzahl an Kriterien sowie vergleichbare und einheitliche Informationen in Bezug auf die jeweilige Aufgabe vorhanden sein sollte. Wichtig ist

zudem die Unabhängigkeit der einzelnen Bewertungskriterien untereinander [Kir11, 59 ff.]. Eine Analyse der Anwendbarkeit der neuen Gestaltungsmöglichkeiten und eine grundsätzliche Auswahl geeigneter Lösungsprinzipien sollte auf Basis qualitativer Kriterien, wie der Zuordnung zu konstruktiven Zielstellungen und Produkteigenschaften, erfolgen [Kle17a; Ric18; Wei18]. Zur Konkretisierung von Lösungsideen und einer Bewertung der generellen technischen Umsetzbarkeit der generierten prinzipiellen Lösungen im Hinblick auf die Anforderungen sind hingegen quantitative Merkmalsausprägungen erforderlich [Kir11, 59], die u.a. realisierbare Funktionen, erreichbare Materialeigenschaften abhängig von prozessspezifischen Faktoren und Verbundfestigkeiten betrachten [Ash04; Pra18b; Vae13]. Neben der Bereitstellung von Informationen zur Entscheidungsunterstützung ist deren Verknüpfung und die daraus resultierende Führung des Systemanwenders entscheidend.

In Bezug auf die Wissensaufbereitung und Entscheidungsunterstützung lassen sich folgende Randbedingungen definieren:

- Anpassung des Abstrahierungsgrads und der Repräsentation der bereitgestellten Informationen an die jeweils unterstützte Aktivität, um Kreativität in der Generierung von prinzipiellen Lösungen zu fördern und Vorfixierungen auf bestimmte Lösungsprinzipien zu vermeiden
- Unterstützung der Auswahl und Konkretisierung von Lösungskonzepten durch die Bereitstellung qualitativer und quantitativer Informationen in Bezug auf Anwendungsbereiche der Prinzipien, verfahrensbedingte gestalterische Möglichkeiten (Gestaltungswissen) und prozesseitige Einflussfaktoren (Technologiewissen) sowie Materialeigenschaften, Materialkompatibilität und Schichtverbundgestaltung

## 4.2 Struktur und Inhalte des Wissenssystems

Auf Basis der in den Abschnitten 4.1.1 und 4.1.2 identifizierten Anforderungen an die Wissensbereitstellung im Kontext der MMM lassen sich die Systemstruktur sowie deren Inhalte definieren. Der grundsätzliche Aufbau des Systems gliedert sich in einen Zugriffsbereich und die Bereitstellung von Prinzipien. Diese sind mit konstruktiven Stellhebeln und Gestaltungshinweisen verknüpft. Weiterhin wird die Materialkompatibilität betrachtet. Die Struktur des Wissenssystems samt Inhalten und entsprechenden Verknüpfungen ist in Abbildung 4.1 schematisch dargestellt.

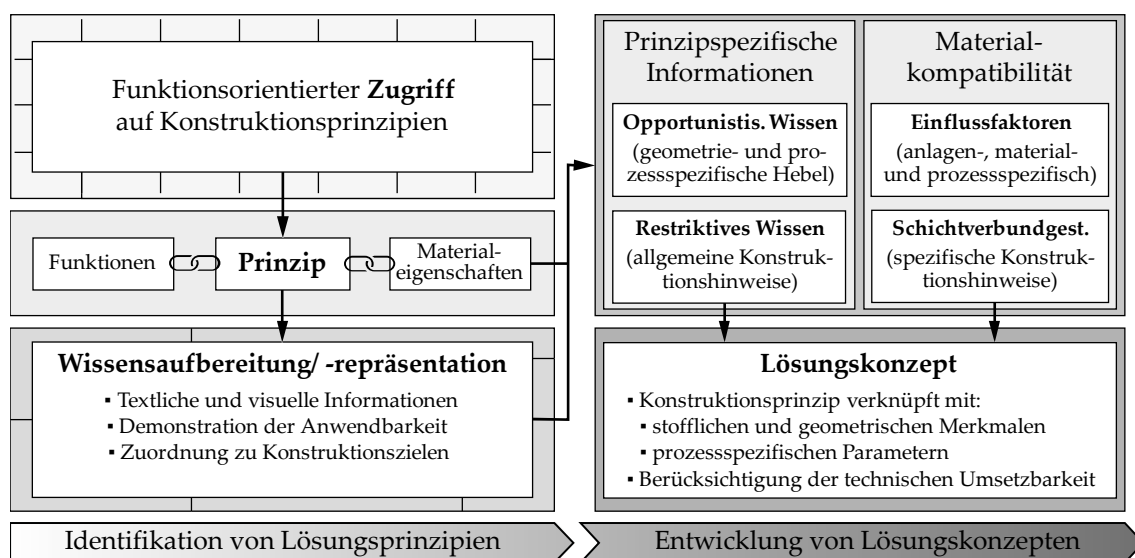


Abbildung 4.1: Aufbau und Inhalte des Wissenssystems

Das Wissenssystem soll folgende Kernaktivitäten innerhalb der Konzeption unterstützen:

- Generierung von Lösungskonzepten durch systematische Wissensbereitstellung in Bezug auf die Gestaltungsmöglichkeiten der MMM
- Entwicklung von Lösungskonzepten durch die Betrachtung geometrie- und prozessspezifischer konstruktiver Freiheiten und Restriktionen
- Auswahl und Bewertung von prinzipiellen Lösungen und Konzepten im Hinblick auf konstruktive Ziele und eine generelle technische Umsetzbarkeit durch die Bereitstellung sowohl qualitativer als auch quantitativer Bewertungskriterien

Die beiden zentralen Elemente des Systems stellen die Datenbasis und der Zugriff auf diese dar. Hierzu sind die bereitgestellten Konstruktionsprinzipien mit Funktionen verknüpft, welche durch dessen Anwendung grundsätzlich realisierbar sind. Da die Prinzipien der MMM zudem auf der Kombination spezifischer Materialeigenschaften basieren, besteht eine starke Verknüpfung zwischen den Prinzipien und den verfügbaren Materialien bzw. deren Eigenschaften. Um sowohl das Potenzial der MMM in Bezug auf geometrie- und prozessspezifische Besonderheiten innerhalb der Konzeption berücksichtigen zu können als auch die generelle technische Umsetzbarkeit im Hinblick auf die Materialkompatibilität mit zu betrachten, werden prinzipispezifische Informationen in Bezug auf Gestaltungsfreiheiten und -restriktionen sowie Materialeigenschaften und Verbundfestigkeiten benötigt. Die Tatsache, dass bei der additiven Fertigung die resultierenden Bauteileigenschaften maßgeblich durch den Fertigungsprozess bestimmt werden, macht neben der Bereitstellung von Gestaltungswissen auch die Bereitstellung von Informationen über prozessspezifische Einflussfaktoren erforderlich. In den nachfolgenden Abschnitten 4.2.1 und 4.2.2 werden die einzelnen Inhalte des Wissenssystems näher erläutert. Die Identifikation von Prinzipien wie auch deren exemplarische Aufbereitung werden in den Abschnitten 5.1 und 5.2 näher beschrieben.

#### 4.2.1 Identifikation von Konstruktionsprinzipien

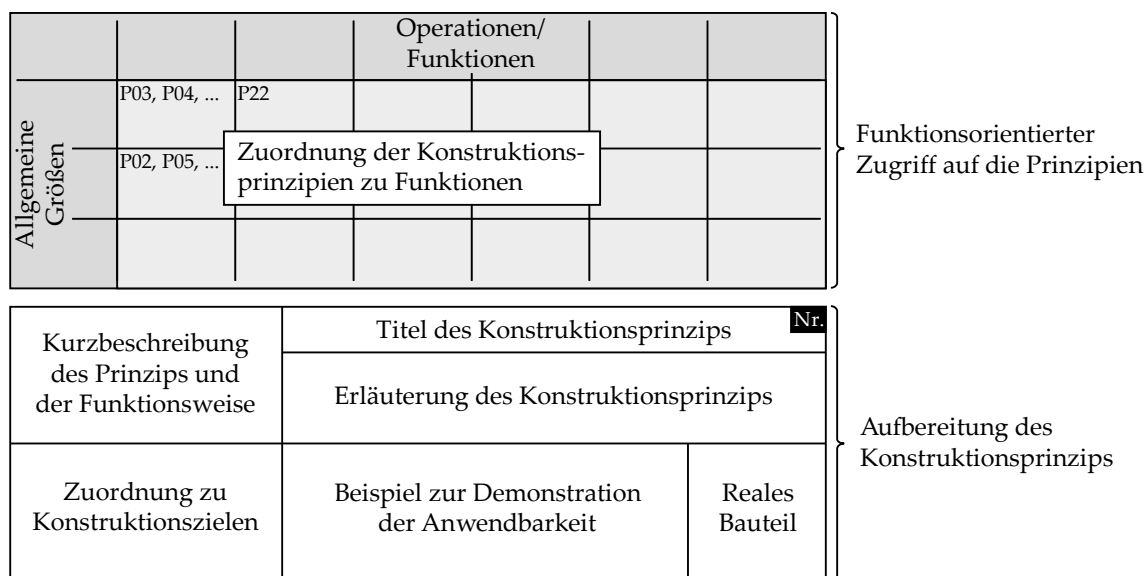
Zum Auffinden geeigneter Informationen zur Erweiterung des Lösungsraums durch die Potenziale der MMM ist ein systematischer Zugriff auf die Datenbasis und speziell auf die Konstruktionsprinzipien notwendig. Ein funktionsorientierter Zugriff bietet neben der Vermeidung von Vorfixierungen und der Sicherstellung einer breiten und kontextunabhängigen Nutzung eine Systematisierung der bereitgestellten Prinzipien. Zudem wird so eine generelle Nutzung des Wissenssystems innerhalb des PEP auf Basis von Funktionsstrukturen ermöglicht und die Gestaltung der Produktarchitektur unterstützt. Das in dieser Arbeit verwendete Set an allgemeinen Größen und Operationen wird auf Grundlage der funktionalen Basis von Stone und Wood [Sto99] sowie den Definitionen von Roth [Rot00, 82 f.] und Pahl/ Beitz [Pah07, 248] wie folgt festgelegt:

- Allgemeine Größen:
  - *Stoff*: Mensch, Gas, Flüssigkeit, Feststoff
  - *Energie*: menschlich, akustisch, biologisch, chemisch, elektrisch, elektromagnetisch, hydraulisch, magnetisch, mechanisch, pneumatisch, radioaktiv, thermisch
  - *Information*: Zustand, Steuerung
- Funktionsklassen und Operationen:
  - *Speichern/Bereitstellen*: speichern, bereitstellen, extrahieren, stoppen, stabilisieren, halten, positionieren

- *Leiten*: importieren, exportieren, übertragen, befördern, lenken, rotieren
- *Vereinigen*: verknüpfen, mischen
- *Verzweigen*: trennen, entfernen, verfeinern, verteilen
- *Umformen*: bewegen, regulieren, ändern, formen, konditionieren
- *Wandeln*: umwandeln

Durch eine Verknüpfung der Konstruktionsprinzipien mit der Erfüllung allgemeiner Funktionen wird zum einen die Kreativität in der Generierung neuer Konzepte gefördert, indem der Zugang zu alternativen Lösungsprinzipien geschaffen wird. Zum anderen wird der Anwendungsbereich der Prinzipien im Hinblick auf einen bestimmten Kontext nicht eingeschränkt. Allerdings kann aus der Verallgemeinerung der technischen Problemstellung ein Mehraufwand entstehen und in Folge der allgemeinen Formulierungen die Lösungssuche nach anwendbaren Prinzipien erschwert werden. Im Einzelfall ist dadurch eine Übertragbarkeit der Prinzipien auf die spezifische Aufgabenstellung erforderlich, bspw. durch das Ergänzen aufgabenspezifischer Begriffe [Pah07, 248].

Abbildung 4.2 zeigt den Zugriff auf die Konstruktionsprinzipien über allgemeine Größen und Operationen bzw. Funktionen sowie die mit dem Konstruktionsprinzip verknüpften Informationen. Hierzu zählen gemäß den definierten Anforderungen beeinflusste Konstruktionsziele, textuelle und visuelle Beschreibungen und reale Anwendungsbeispiele. Die bereitgestellten Informationen dienen der Erleichterung der Anwendbarkeit der Prinzipien auf die Problemstellung und zur Anregung der Kreativität. Die Konstruktionsprinzipien stellen ein zentrales Element in der Datenbasis dar und bilden die Grundlage für die Generierung von prinzipiellen Lösungen und die Entwicklung von Lösungskonzepten, indem Funktionen mit Wirkprinzipien verknüpft werden. Dies bildet wiederum die Basis für den Bauteilentwurf und die Definition einer Systemarchitektur.



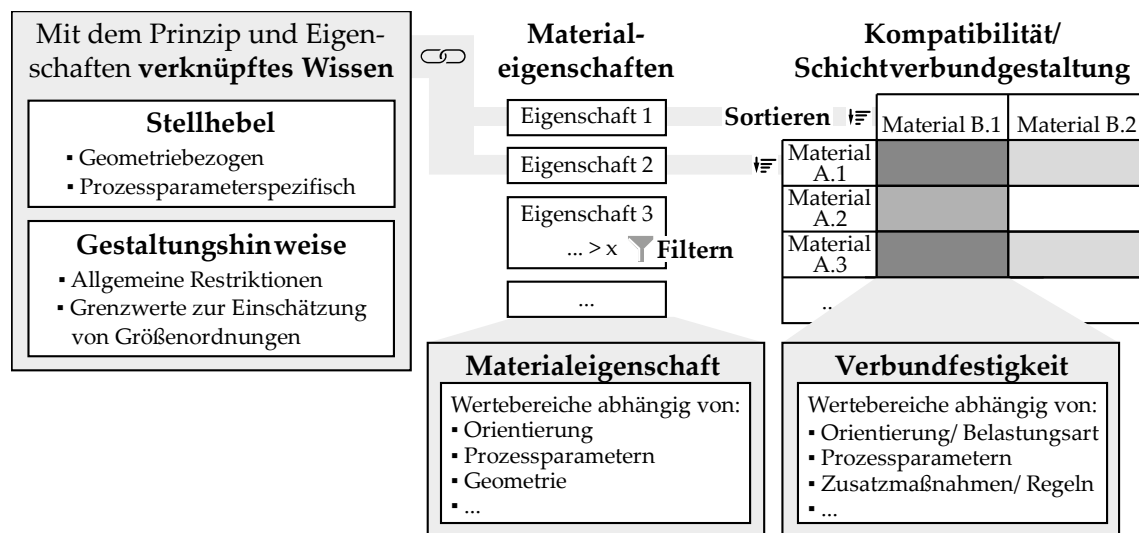
**Abbildung 4.2:** Zugriffslogik und Prinzipienaufbereitung (basierend auf [Wat19c])

#### 4.2.2 Entwicklung von Lösungskonzepten

Die in Abbildung 4.2 dargestellten Informationen in Bezug auf die Konstruktionsprinzipien erlauben einerseits die Unterstützung der Entwicklung von Lösungskonzepten und ermöglichen andererseits eine generelle Beurteilung der Eignung für die jeweilige technische Problemstellung. Die



methodische Unterstützung zur Entwicklung von Lösungskonzepten setzt darüber hinaus eine Betrachtung AM-spezifischer Gestaltungsmöglichkeiten und -grenzen voraus, welche eine Bewertung im Hinblick auf Anforderungen und die technische Umsetzung zulassen. Dies erfordert quantitative Bewertungskriterien und somit die Bereitstellung detaillierter Informationen. Die Prinzipienbereitstellung zur gezielten Unterstützung der Erarbeitung prinzipieller Lösungen umfasst daher zusätzlich prinzipspezifische Stellhebel (opportunistisches Wissen) und Gestaltungshinweise (restriktives Wissen) sowie Informationen über verfügbare Materialien, deren Eigenschaften und Kompatibilitäten. Abbildung 4.3 zeigt schematisch die bereitgestellten Informationen innerhalb des Systems. Die Zuordnung der Konstruktionsprinzipien zu den Stellhebeln erfolgt im Wesentlichen auf Basis der mit dem Konstruktionsprinzip verknüpften Materialeigenschaften. Hierbei werden die Prinzipien auf der einen Seite mit prozessspezifischen Größen bzw. Verfahrensparametern (siehe Tabelle 2.2) und auf der anderen Seite mit geometriebezogenen Gestaltungsmöglichkeiten verknüpft (siehe [Kum17a]), durch welche eine Beeinflussung der mit dem Prinzip verknüpften Eigenschaften erfolgen kann.



**Abbildung 4.3:** Konkretisierung von Lösungsprinzipien durch Betrachtung verfahrensspezifischer Gestaltungsmöglichkeiten und Grenzen sowie der Materialkompatibilität (basierend auf [Wat19c])

Das verknüpfte restriktive Wissen ist dabei vorrangig auf qualitative Gestaltungshinweise beschränkt. Hierdurch soll die technische Umsetzbarkeit sichergestellt werden, gleichzeitig aber eine Einschränkung der Kreativität in der Entwicklung der Lösungskonzepte verhindert werden. Zudem werden quantitative Informationen in Form von Wertebereichen bereitgestellt zur Einschätzung von Größenordnungen in Bezug auf geometrische Abmessungen und zur Abschätzung der Erfüllung technischer Vorgaben, z.B. mechanisch-technologische oder elektrische Eigenschaften. Die Wertebereiche der jeweiligen Eigenschaft hängen in der Regel von der Bauteilgeometrie, den gewählten Prozessparametern und der Bauteilorientierung sowie der verwendeten Fertigungsanlage ab. Um darüber hinaus innerhalb der Entwicklung prinzipieller Lösungen eine gezielte Nutzung dieser prozessspezifischen Einflussfaktoren (opportunistisches Wissen) zu ermöglichen, müssen diese im Kontext der MMM frühzeitig betrachtet werden. Nur so kann eine gezielte Verknüpfung des Prinzips zu stofflichen und geometrischen Merkmalen erfolgen und eine Gegenüberstellung unterschiedlicher Lösungskonzepte unter Betrachtung der AM-spezifischen Potenziale und Grenzen ermöglicht werden. Die Identifikation und Aufbereitung der Informationen in Bezug auf die prinzipspezifischen Stellhebel und Gestaltungshinweise wird in Abschnitt 5.2 de-

tailliert beschrieben. Quantitative Werte werden für ausgewählte Prinzipien mittels experimenteller Untersuchungen in den Abschnitten 7.1 und 7.2 im Zusammenhang der prototypischen Umsetzung des Wissenssystems ermittelt und aufbereitet.

Zur Definition der Systemarchitektur ist neben der Festlegung der groben Bauteilgestalt und prozessspezifischer Stellhebel die Betrachtung der Materialkompatibilität unumgänglich. Zusätzlich zur Bereitstellung von Daten zu Verbundfestigkeiten sind daher Informationen zur Schichtverbundcharakterisierung und -gestaltung unter Berücksichtigung der wesentlichen Einflussfaktoren zur Bewertung einer generellen technischen Umsetzbarkeit notwendig. Die Akquisition von Informationen zur Schichtverbundgestaltung ist in Kapitel 6 beschrieben. Um die Materialauswahl für die Systemanwender zu unterstützen, werden die Materialien innerhalb der Kompatibilitätsmatrix in Bezug auf den Maximal- bzw. Minimalwert der jeweils verknüpften Eigenschaft in absteigender Reihenfolge sortiert. Dies erleichtert die Auswahl einer geeigneten Materialkombination. Filterfunktionen können innerhalb der Entwicklung von Lösungskonzepten helfen, zusätzliche Randbedingungen bzw. Anforderungen zu berücksichtigen und auf diese Weise die Komplexität in der Lösungsauswahl reduzieren. Neben der Materialkompatibilität und der mit dem Konstruktionsprinzip direkt verknüpften Eigenschaften können in Bezug auf die technische Problemstellung somit weitere Materialeigenschaften, wie chemische oder Temperaturbeständigkeit, relevant sein. Auf die Filter- und Sortierfunktion zur gezielten Entscheidungsunterstützung wird im Zusammenhang der prototypischen Umsetzung des Wissenssystems in Abschnitt 7.3 näher eingegangen.

### 4.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel sind zunächst auf Basis des Stands der Technik die Anforderungen an ein System zur Bereitstellung von spezifischem Wissen in Bezug auf die konstruktiven Möglichkeiten der MMM definiert worden, um eine systematische Unterstützung in der Bauteilkonzeption bereitzustellen und auf diese Weise die Generierung alternativer Lösungskonzepte zu ermöglichen. Der generelle Aufbau des Systems mit der Festlegung der Inhalte und den Verknüpfungen bildet die Grundlage für die Erarbeitung der Inhalte in Bezug auf die Konstruktionsprinzipien für die MMM (Kapitel 5), die Schichtverbundgestaltung (Kapitel 6) wie auch für, die Ermittlung prinzipispezifischer qualitativer Stellhebel und Konstruktionshinweise und quantitativer Kennwerte (Abschnitte 7.1 und 7.2) sowie eine anschließende prototypische Umsetzung und Anwendung des Systems in Form einer Graphendatenbank (Abschnitt 7.3).

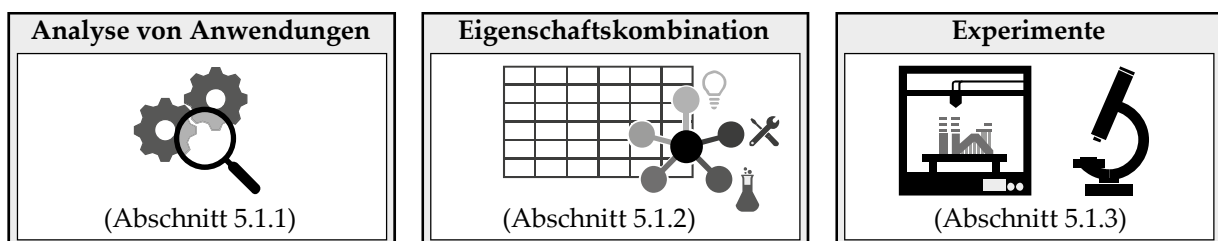
## 5 AUFBEREITUNG VON KONSTRUKTIONSPRINZIPIEN FÜR DIE MMM

Die Entwicklung neuartiger Lösungskonzepte ist eng mit dem verfügbaren Wissen des Produktentwicklers und somit mit der Bereitstellung von Wissen verknüpft [Hat03; Ric18]. Eine zentrale Herausforderung in der Entwicklung von alternativen Lösungskonzepten unter Berücksichtigung der konstruktiven Möglichkeiten der MMM liegt in einer systematischen Bereitstellung spezifischer Lösungsprinzipien, welche die Realisierung einer oder mehrerer Funktionen beschreiben und dabei die Besonderheiten der additiven Fertigung betrachten [Pra18b; Ric18] (Abschnitt 5.4).

Die Wissensbereitstellung erfordert zunächst eine Identifikation von Lösungsprinzipien, die anhand unterschiedlicher Quellen wie Beispielbauteilen oder experimentellen Untersuchungen abgeleitet werden können (Abschnitt 5.1). Auf der Grundlage der zuvor definierten Anforderungen an eine systematische Wissensbereitstellung im Kontext der MMM (vgl. Abschnitt 4.1.2) erfolgt eine Aufbereitung der Prinzipieninhalte wie auch eine anschließende Verknüpfung mit opportunistischem und restriktivem AM-Wissen (Abschnitt 5.2). Hieraus lassen sich abschließend konkrete Prinzipien für die MMM identifizieren und durch eine entsprechende Aufbereitung innerhalb der Produktentwicklung zur Entwicklung von Lösungskonzepten nutzbar machen (Abschnitt 5.3).

### 5.1 Vorgehen zur Identifikation und Ableitung von Konstruktionsprinzipien

In der Literatur werden unterschiedliche Methoden angewendet, um Konstruktionsprinzipien bzw. Heuristiken zu identifizieren. Diese können hinsichtlich der in Abbildung 5.1 dargestellten Möglichkeiten unterschieden werden. Die Methode der Analyse von Schlüsselfunktionen und spezifischen Merkmalen ausgewählter Produkte ist von Yilmaz et al. (2010) [Yil10] zur Ableitung kontextabhängiger Prinzipien angewendet worden und konnte von Blösch-Paidosh und Shea [Blo19] erfolgreich auf additiv gefertigte Bauteile zur Identifikation von AM-spezifischen Heuristiken übertragen werden. Bader et al. (2019) [Bad19] demonstrieren die Identifikation von konstruktiven Potenzialen für den Mehrkomponentenspritzguss anhand einer Analyse von Multi-Material-Bauteilen. Zudem können Prinzipien für die MMM auf Basis einer systematischen Analyse und Gegenüberstellung von potenziellen Eigenschaftskombinationen verfügbarer Materialien (vgl. Abbildung 2.4) identifiziert werden. Eine weitere Möglichkeit zur Ableitung von Prinzipien sowie der Bewertung deren Potenzials im Hinblick auf den Nutzen und eine technische Umsetzbarkeit ist die Durchführung experimenteller Untersuchungen in Bezug auf die Realisierung spezifischer Funktionen mittels MMM, z.B. eine Integration von wärmeabstrahlenden Funktionsflächen (u.a. [Dul18; Wat17a; Wat19a]) oder von passiven Dämpfungsstrukturen (u.a. [Rot17; Rot18]).



**Abbildung 5.1:** Möglichkeiten zur Identifikation von Prinzipien für die MMM

Auch wenn die Ansätze zur Identifikation von Prinzipien für die MMM nicht gänzlich isoliert voneinander betrachtet werden können, sind nachfolgend (Abschnitte 5.1.1 bis 5.1.3) die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Identifikation spezifischer Lösungsprinzipien separat beschrieben.

### 5.1.1 Ableitung von Konstruktionsprinzipien anhand von Anwendungen

Die Ableitung von Konstruktionsprinzipien anhand bestehender Bauteile bzw. Anwendungen (vgl. [Yil10; Blo19]) wird in diesem Abschnitt anhand eines mittels MMM gefertigten piezoresistiven Sensors exemplarisch vorgestellt. Hierzu werden neben den Schlüsselfunktionen und Gestaltungsmerkmalen auch die verwendeten konstruktiven Freiheiten der additiven Fertigung analysiert. Die Zuordnung zu Funktionen findet auf Basis der in Abschnitt 4.2.1 getroffenen Auswahl statt. Abbildung 5.2 zeigt die generellen Aspekte, welche bei der Analyse eines Anwendungsbeispiels betrachtet werden. Zudem werden Geometriemerkmale im Hinblick auf die gezielte Nutzung prozess- und geometriespezifischer Stellhebel der additiven Fertigung analysiert. Auf Grundlage dieser Analyse kann das zugrundeliegende Konstruktionsprinzip formuliert werden und eine Verknüpfung mit den realisierbaren Funktionen sowie genutzten Materialeigenschaften erfolgen.

Titel/Bezeichnung	Abbildung(en)
<b>Beschreibung des Bauteils bezüglich:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bauteileigenschaften, zugrundeliegende physikalische Effekte</li> <li>▪ Konstruktive Ziele bzw. Nutzen</li> </ul>	<b>Genutzte Stellhebel/Grenzen:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ geometriebezogen</li> <li>▪ prozessparameterspezifisch</li> </ul>
<b>Beschreibung des Konstruktionsprinzips:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verknüpfung mit Funktion(en)</li> <li>▪ Verknüpfung mit Materialeigenschaft(en)</li> </ul>	
	<b>Quellenangabe(n)</b>

**Abbildung 5.2:** Maske zur Ableitung von Konstruktionsprinzipien anhand von bestehenden Anwendungsbeispielen für die MMM

In Abbildung 5.3 ist beispielhaft die Analyse eines mittels MMM hergestellten Dehnungssensors zur Messung der lokalen Verformung einer flexiblen Bauteilstruktur (siehe [Lei12]) aufgeführt. Zur Integration einer Sensorfunktion bzw. der *Bereitstellung von Informationen* über die Verformung wird das piezoresistive Verhalten des verwendeten elektrisch leitfähigen Materials genutzt, welches mit Industrieruß gefüllt ist. Durch die MMB wird einerseits die Anzahl von Montageschritten minimiert. Andererseits kann durch eine Verringerung der Fügestellen der Bauraumbedarf gesenkt und gleichzeitig das Gewicht aufgrund von Materialeinsparungen reduziert werden (siehe Zusammenhänge funktionsintegrierter Bauteile [Zie12, 155]). Durch eine formschlüssige Integration der piezoresistiven Struktur wird das Sensorelement fest mit der flexiblen Bauteilstruktur verbunden und so eine Zuverlässigkeitssteigerung bzw. Erhöhung der Robustheit erreicht.

<b>Sensorstruktur zur Messung von Verformung</b>  Die Nutzung von elektrisch leitfähigen Materialien mit von der Verformung abhängigem Widerstand ( <i>piezoresistiver Effekt</i> ) ermöglicht die Integration von Sensorelementen in eine Bauteilstruktur. Durch die Multi-Material-Bauweise können <i>Montageschritte</i> eingespart und der <i>Bauraum</i> reduziert sowie <i>Gewicht</i> eingespart werden.	
<i>Bereitstellen von Informationen</i> über den Zustand der Verformung einer Bauteilstruktur durch eine lokale Integration von Materialien mit piezoresistivem Verhalten in flexible Bauteilbereiche.	Einstellung des elektrischen Widerstands und der Steifigkeit der Sensorstruktur über die <i>Bauteilgeometrie</i> und die Wahl der <i>Prozessparameter</i> (u.a. Rasterwinkel). Verwendung von <i>formschlüssigen Verbindungen</i> zur Integration der Sensorstruktur, um eine Ablösung zu verhindern.
[Leigh et al. (2012), A Simple, Low-Cost Conductive Composite Material for 3D Printing of Electronic Sensors]	

**Abbildung 5.3:** Analyse eines mittels MMM hergestellten Sensors zur Messung von Verformungen, bestehend aus einem flexiblen Material und einem Material mit piezoresistiven Eigenschaften (Bild aus [Lei12])

Anhand der Unterschiede der elektrischen Widerstände der einzelnen Finger ist zu erkennen, dass diese über die Geometrie – in diesem Fall die Länge – beeinflusst werden. Durch die Geometrie bzw. im Wesentlichen die Höhe wird zudem die Steifigkeit des Sensorelements bestimmt. Zusätzlich wirkt sich der Rasterwinkel auf die mechanischen und elektrischen Eigenschaften aus, sodass dieser gezielt zu deren Einstellung genutzt werden kann. Auf der Grundlage der Analyse dieses und weiterer Anwendungsbeispiele der MMM lassen sich spezifische Lösungsprinzipien ableiten und mit verfahrensspezifischen Stellhebeln sowie konstruktiven Zielen verknüpfen.

### 5.1.2 Ableitung von Konstruktionsprinzipien anhand von Eigenschaftskombinationen

Die Ableitung von Konstruktionsprinzipien anhand theoretischer Überlegungen zu potenziellen Eigenschaftskombinationen basiert auf einer Analyse verfügbarer Materialien und deren Eigenschaften für die Materialextrusion. Die Grundlage hierfür bildet die Entwicklung von strukturierten Materialdatenbanken, die u.a. durch numerische Attribute eine gezielte Identifikation und Auswahl geeigneter Materialien zur Realisierung spezifischer Funktionen sowie zur Erfüllung bestimmter Anforderungen und dem Erreichen spezifischer Ziele unterstützen [Ash04]. Übersichten von auf dem Markt verfügbaren Materialien sind bspw. von Materialherstellern oder in herstellerübergreifenden Datenbanken (u.a. bei 3druck.com [3dr19], simplify3d.com [Sim19]) verfügbar. Hierauf aufbauend kann durch eine tabellarische Übersicht zur Gegenüberstellung unterschiedlicher Materialeigenschaften eine systematische Kombination unterschiedlicher Eigenschaften und ggf. physikalischer Effekte (vgl. [VA05; Tue16, 164 ff.]) erfolgen. Hieraus lassen sich anschließend Prinzipien zur Realisierung spezifischer Funktionen mittels MMM identifizieren. Tabelle 5.1 zeigt diese Gegenüberstellung exemplarisch anhand einer Auswahl einzelner Eigenschaften, da der Fokus eine Demonstration der Vorgehensweise der Prinzipienidentifikation ist.

**Tabelle 5.1:** Gegenüberstellung von Materialeigenschaften zur Identifikation von Konstruktionsprinzipien für die MMM (Auswahl)

Material- eigenschaften	Mechanisch-technologische Eigenschaften				Zeitlich veränderliche Eigenschaften		Elektrische Eigenschaften	
	Festigkeit		Steifigkeit		Geometrie- änderung	Farb- wechsel	Elektrische Leitfähigkeit	
	↑	↓	↑	↓			↑	↓
Mechanisch-technologische Eigenschaften								
Festigkeit	↑							
(Zug/Biegung)	↓							
Steifigkeit	↑							
(Zug/Biegung)	↓		P01					
Zeitlich veränderliche Eigenschaften								
Geometrieänderung								
Farbwechsel								
Elektrische Eigenschaften								
Elektrische	↑				P21			
Leitfähigkeit	↓							

Durch eine Kombination eines Materials mit hoher Biegesteifigkeit und einem Material mit niedriger Biegesteifigkeit und gleichzeitig hoher Bruchdehnung (P01) kann u.a. eine Gelenkfunktion umgesetzt und die Funktionen *mechanische Energie leiten* sowie *Feststoff umformen* realisiert

werden. Dies erweitert die Möglichkeiten der Realisierung von Gelenkfunktionen mittels lokaler Wandstärkenvariation, da der Einstellbereich der Steifigkeit durch eine Kombination von Material- und Geometrievariation erweitert wird. Ein weiteres Beispiel ist die Verknüpfung eines elektrisch leitfähigen Polymers mit einem Material mit durch Wärme aktivierbaren Formgedächtniseigenschaften unter gleichzeitiger Nutzung des Effekts der Widerstandserwärmung. Hierdurch lassen sich u.a. die Funktionen *thermische Energie bereitstellen* und *Verformung eines Feststoffs* durch die *Speicherung von Informationen/Zuständen* verknüpfen und so bspw. körperangepasste/ergonomische Strukturen herstellen. Dies wird dadurch möglich, dass durch die lokale Wärmeerzeugung lokal eine plastische Verformung reversibel rückgängig gemacht und auf diese Weise die Bauteilgeometrie erneut durch plastische Verformung an die jeweilige Anthropometrie angepasst werden kann (P21). Weiterhin wäre aus dieser Eigenschaftskombination auch die Realisierung einer Gelenk- oder Greiffunktion denkbar (vgl. [Yan18]). Dies eröffnet eine große Vielzahl an theoretischen Möglichkeiten für die Realisierung bestimmter Funktionen. Aus den theoretischen Überlegungen resultiert jedoch auch ein Bedarf der Abschätzung des Potenzials sowohl im Hinblick auf die technische Umsetzbarkeit als auch den Nutzen. Eine Möglichkeit hierfür bietet die Durchführung experimenteller Untersuchungen.

### 5.1.3 Identifikation von Konstruktionsprinzipien mittels experimenteller Untersuchungen

Eine weitere Möglichkeit zur Identifikation von Konstruktionsprinzipien für die MMM bieten experimentelle Untersuchungen zur Realisierung bzw. Integration spezifischer Funktionen auf der Basis bestimmter physikalischer Effekte und der Kombination mehrerer Materialien. Watschke et al. (2019a) [Wat19a] führen verschiedene Untersuchungen zu leitfähigen Polymeren im Hinblick auf die Möglichkeit der additiven Fertigung zur Realisierung wärmeabstrahlender Strukturen basierend auf der Widerstandserwärmung von elektrischen Leitern durch. Neben der Identifikation von Konstruktionsprinzipien zum *Bereitstellen thermischer Energie* und dem *Bereitstellen bzw. Stoppen elektrischer Energie* werden auf Basis der Versuche geometrie- und prozessspezifische Stellhebel in Bezug auf die Einstellung des elektrischen Widerstands wie auch konstruktive Hinweise ermittelt. In Tabelle 5.2 sind die identifizierten Konstruktionsprinzipien aufgeführt.

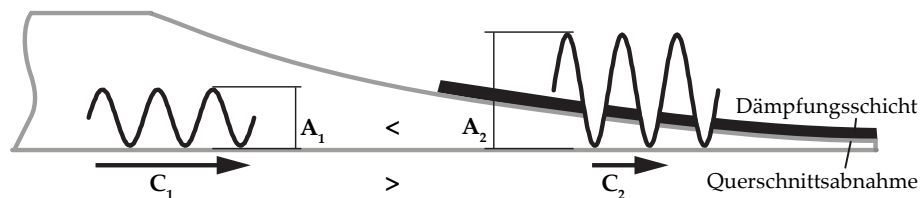
**Tabelle 5.2:** Identifikation von Konstruktionsprinzipien für die MMM in Bezug auf das Bereitstellen thermischer Energie sowie das Bereitstellen/Stoppen elektrischer Energie (basierend auf [Wat19a])

Konstruktionsprinzip	Genutzte Effekte	Stellhebel	Konstruktionshinweise
Variation des Bereitstellens thermischer Energie durch Geometrie/Prozess	Einstellbarkeit des elektrischen Widerstands	Geometrie, Prozessparameter (u.a. Rasterwinkel) zur Widerstandseinstellung	Beeinflussung des Widerstands durch Strukturbreite (Umkehrpunkte)
Stoppen der elektrischen Energie infolge der Erwärmung (Begrenzung)	Widerstandsanstieg durch Erweichung des Matrixpolymers	Matrixpolymer; Geometrie, Prozessparameter zur Widerstandseinstellung	Sicherstellung der Reversibilität der Erweichung (keine Strukturdefekte)
Bereitstellen thermischer Energie zum Umformen von Feststoffen	Widerstandserwärmung; Shape-Memory-Effekt	Einstellbarkeit der Steifigkeit und des elektrischen Widerstands über Geometrie und Prozessparameter	Wechselwirkungen zwischen mechanischen und elektrischen Eigenschaften bei Geometrie-/Prozessparametervariation
Übertragen von thermischer Energie an Fluide (Gase/Flüssigkeiten)	Widerstandserwärmung	Zellgeometrie, Stabdurchmesser zur Widerstandseinstellung und Oberfläche	Beeinflussung des Widerstands durch Oberflächengüte an Überhängen

Passive Dämpfungsmaßnahmen wie die Methode des Akustischen Schwarzen Lochs ermöglichen eine Gewichtsreduzierung im Vergleich zu konventionellen Methoden. ASL zeichnet sich dadurch

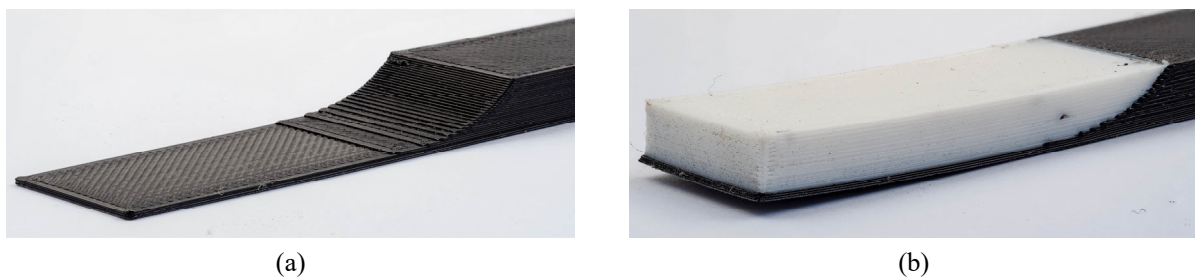


aus, dass die Wandstärke der schwingenden Struktur definiert bis auf ein fertigungsbedingtes Minimum abnimmt. Innerhalb des Querschnitts mit abnehmender Wandstärke wird die Geschwindigkeit der Biegeschwingung – im Idealfall auf null – reduziert und gleichzeitig steigt die Amplitude an (siehe Abbildung 5.4). Hieraus resultiert eine Dämpfung der Gesamtstruktur, also dem Bereich außerhalb des ASL [Rot17; Rot18; Unr15a; Unr15b].



**Abbildung 5.4:** Darstellung des Funktionsprinzips des ASL-Effekts mit Dämpfungsschicht (basierend auf [Rot17])

Durch eine Integration passiver Dämpfungsmaßnahmen ist zwar eine Gewichtsreduzierung möglich, gleichzeitig steigen bei konventionellen Herstellverfahren wie dem Fräsen durch den hohen Fertigungsaufwand aber auch die Bauteilkosten. Aufgrund der konstruktiven Möglichkeiten im Hinblick auf die Kombination von Materialien unterschiedlicher Steifigkeiten und den Freiheiten in der Geometriegestaltung ermöglicht die additive Fertigung hingegen eine vergleichsweise einfache Integration solcher Dämpfungsstrukturen. Experimentelle Untersuchungen an einfachen Balkenstrukturen demonstrieren eine technische Umsetzbarkeit mittels MMM und zeigen die Wirksamkeit additiv gefertigter Dämpfungsstrukturen in Multi-Material-Bauweise aus einer Kombination von einem starren und einem flexiblen Material sowie unter Nutzung des ASL-Effekts (Formfunktion) auf [Rot17; Rot18]. In Abbildung 5.5 ist jeweils ein Ausschnitt einer additiv gefertigten Balkenstruktur mit Formfunktion gezeigt, wobei (a) ohne und (b) mit einem zusätzlichen flexiblen Material gefertigt worden ist. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Formfunktion des ASL aufgrund des schichtweisen Materialauftrags und dem daraus resultierenden Treppenstufeneffekt in Abhängigkeit von der Schichthöhe nur angenähert wird. Hieraus lassen sich Konstruktionshinweise im Hinblick auf eine Integration von solchen Dämpfungsstrukturen ableiten.



**Abbildung 5.5:** Additiv gefertigte Balkenstruktur mit integriertem ASL (a) ohne und (b) mit zusätzlicher Dämpfungsstruktur aus einem flexiblen Material (vgl. [Rot18])

## 5.2 Wissensaufbereitung von Konstruktionsprinzipien für die MMM

Neben der Wichtigkeit der Bereitstellung spezifischer Wissensinhalte in Bezug auf Lösungsprinzipien (siehe Abschnitt 4.2) ist für die Förderung der Kreativität in der Entwicklung alternativer Lösungen auch die Art der Wissensaufbereitung von großer Bedeutung [Kum17a; Lav17; Pra18b; Ric17; Wat17b]. Textuelle und visuelle Informationen fördern die Kreativität. Die Bereitstellung realer Anwendungsbeispiele kann neben positiven Effekten auch zu Einschränkungen der Kreativität innerhalb der Entwicklung von Lösungen durch die Erzeugung von Vorfixierungen führen

[Jan91; Pra18b], erleichtert in der Regel aber die Anwendbarkeit der Wissensinhalte bzw. Prinzipien, da Möglichkeiten der Übertragbarkeit aufgezeigt werden. 3-D-Modelle können zudem die Inspiration und eine realistische Einschätzung von konstruktiven Möglichkeiten fördern, indem vielseitige Informationen und reale Eindrücke u.a. in Bezug auf Auflösungsgrenzen, Materialeigenschaften oder die Oberflächenbeschaffenheit vermittelt werden [Kum17a; Pra18b; Wat17b].

Die Aufbereitung von Konstruktionsprinzipien umfasst die Zuordnung zu realisierbaren Funktionen sowie eine Verknüpfung mit physikalischen Effekten, Geometriemerkmalen und stofflichen Eigenschaften [VDI18a; Pah07], wobei kein konkreter Anwendungsbezug besteht [VDI97]. Zur Unterstützung der Prinzipienanwendung und somit der Designsynthese innerhalb der Konzeption in Bezug auf die Ermittlung von u.a. Geometriemerkmalen und Materialien zur Erfüllung vorgeschriebener konstruktiver Ziele und Funktionen sollte die Prinzipienaufbereitung konsistent sein und folgende Inhalte mit grafischen und textuellen Elementen umfassen (vgl. Abbildung 4.2, Abschnitt 4.2.1) [Ink16, 84 ff.; Kle16; Per18, 82 f.; Ric17; Ric18; Sch19; Wat19c]:

- *Titel* mit Zuordnung zur realisierbaren Funktion und Materialeigenschaften
- Beschreibung der *Funktionsweise* bzw. des zugrundeliegenden *physikalischen Effekts*
- Zuordnung zu konstruktiven *Zielstellungen* bzw. dem *Nutzen*
- *Erläuterung und Visualisierung* des Konstruktionsprinzips im Kontext der MMM
- Demonstration einer beispielhaften *Umsetzbarkeit* mit Illustration eines Anwendungsbeispiels
- Zuordnung zu opportunistischem und restriktivem AM-Wissen

Der *Titel* der Konstruktionsprinzipien drückt den Zusammenhang zwischen prinzipienbezogenen umsetzbaren Funktionen und zugeordneten Materialeigenschaften aus (siehe Abbildung 4.1) und ist nach folgendem Schema aufgebaut:

Integration/Erhöhung/Reduzierung von [**Funktion(en)**]  
durch Kombination/lokale Verwendung von [**verknüpften Materialeigenschaften**]

Im Vergleich zur Beschreibung der allgemeinen Funktionen bzw. Operationen innerhalb der Zugriffsllogik (vgl. Abschnitt 4.2.1) ist die realisierbare Funktion innerhalb des Titels des Prinzips spezifischer definiert, um eine initiale Eignung des Lösungsprinzips für den spezifischen Anwendungsfall einfacher beurteilen zu können. Eine vergleichbare Syntax verwendet auch Perez (2018) für die Bezeichnung der identifizierten Prinzipien, indem die adressierte Problemstellung mit der AM-spezifischen Modifikation im Titel verknüpft wird [Per18, 43]. Hierdurch wird ein Kompromiss zwischen einer breiten Anwendbarkeit durch Verallgemeinerung bzw. Abstraktion des Prinzips und einer gleichzeitig einfachen Übertragbarkeit auf den jeweiligen Kontext erreicht.

Die Identifikation geeigneter Lösungsprinzipien wird zusätzlich durch die *Beschreibung der Funktionsweise* mit textuellen und grafischen Elementen sowie die Zuordnung zu *konstruktiven Zielstellungen* unterstützt, indem so das Verständnis für das Lösungsprinzip gesteigert und eine Einschätzung des Nutzens in Bezug auf die vorliegende technische Problemstellung ermöglicht wird. Zur Konkretisierung von Lösungsansätzen ist eine Übertragung und Anwendung auf die spezifischen Randbedingungen der technischen Problemstellung erforderlich. Dies wird durch eine *Erläuterung und Visualisierung* des Konstruktionsprinzips erreicht, wobei grafische Elemente die Kreativität fördern und das Verständnis erleichtern. Die Qualität der entwickelten Lösungen wird durch die Repräsentation einer *beispielhaften Umsetzung* gesteigert, indem Möglichkeiten zur technischen Umsetzbarkeit wie auch Verknüpfungen zu weiteren AM-spezifischen Potenzialen



aufgezeigt werden. Um hieraus resultierende Einschränkungen durch Vorfixierungen zu verringern, sind die demonstrierten Umsetzungen allgemein gehalten und nicht auf einen spezifischen Anwendungsfall reduziert (siehe Abbildung 5.6 und Abbildung 5.8 in Abschnitt 5.3).

Eine weitere Konkretisierung der Lösungskonzepte wird durch eine Verknüpfung mit geometrischen Merkmalen (Auslegungshinweisen) ermöglicht. Diese erfordert eine systematische Zuordnung zu AM-spezifischen Potenzialen und Grenzen in Bezug auf das jeweilige Konstruktionsprinzip. Neben einer gezielten Nutzung der konstruktiven Freiheiten von AM wird hierdurch eine Betrachtung bzw. Beurteilung der generellen technischen Umsetzbarkeit im Hinblick auf die spezifischen Randbedingungen der Problemstellung erreicht.

Um eine systematische Berücksichtigung konstruktiver und prozessparameterspezifischer *Stellhebel* zu ermöglichen, werden diese mit den prinzipienbezogenen Materialeigenschaften in Form von textuellen Beschreibungen und Illustrationen verknüpft. Aus der Verknüpfung mit dem opportunistischen Wissen resultiert eine gezielte Nutzung der AM-spezifischen Gestaltungsmöglichkeiten bei der Entwicklung von Lösungskonzepten. Für die Identifikation der prinzipispezifischen Stellhebel wird einerseits auf die Potenzialsystematik nach Kumke et al. (2017) [Kum17a] zurückgegriffen. Andererseits wird die Analyse von prozessspezifischen Einflussfaktoren auf resultierende Bauteileigenschaften (vgl. Tabelle 2.2) genutzt. In Tabelle 5.3 ist das Vorgehen der systematischen Identifikation von Stellhebeln anhand einer beispielhaften Zuordnung von Konstruktionsmerkmalen und Prozessparametern für eine Auswahl an Eigenschaften gezeigt. Diese Zuordnung wird in Abschnitt 5.3 anhand spezifischer Konstruktionsprinzipien demonstriert (siehe Abbildung 5.7 und Abbildung 5.9).

**Tabelle 5.3:** Beispielhafte Zuordnung von ausgewählten Konstruktionsmerkmalen und Prozessparametern zu prinzipispezifischen Eigenschaften im Hinblick auf deren gezielte Berücksichtigung in der Konzeption

Prinzipienbezogene Bauteileigenschaften	Stellhebel									
	Konstruktionsmerkmale					Prozessparameter				
	...	Variable Wandstärken	Gradierte Gitterstrukturen	Interne Kanalstrukturen	...	...	Schichthöhe/ bzw. -dicke	Füllmuster/-orientierung	Füllgrad	...
Mechanisch-technologische Eigenschaften										
Festigkeit (Zug/Biegung)		•						•	•	
Steifigkeit (Zug/Biegung)		•	•					•	•	
Thermische Eigenschaften										
Wärmeleitfähigkeit		•	•						•	
Elektrische Eigenschaften										
Elektrische Leitfähigkeit			•				•	•	•	

• Identifizierter Stellhebel; Zuordnung von Konstruktionsmerkmalen und Prozessparametern, basierend auf [Kum17a] bzw. Tabelle 2.2 (starke Einflussfaktoren)

Die Verknüpfung mit *restriktivem Wissen* zielt primär auf eine realistische Einschätzung des entwickelten Lösungskonzepts in Bezug auf allgemeine verfahrenstechnische Restriktionen sowie eine grundlegende Betrachtung konstruktiver Herausforderungen ab, welche u.a. bei der Geometriefestlegung oder der Produktarchitekturgestaltung zu beachten sind. Die Repräsentation erfolgt durch textuelle und grafische Elemente. Die Hinweise (vgl. Abschnitt 2.2.3) berücksichtigen bspw. die Festlegung der Bauteilorientierung, Auflösungsgrenzen, die Beschaffenheit von Oberflächen,

Einschränkungen in der Maßhaltigkeit infolge des Schichtbauprinzips oder die Materialkompatibilitäten bzw. die Schichtverbundgestaltung. Letztere wird ausführlich in Kapitel 6 betrachtet.

### 5.3 Ableitung spezifischer Konstruktionsprinzipien

In diesem Abschnitt wird die Ableitung spezifischer Konstruktionsprinzipien für die MMM anhand folgender zwei Beispiele aufgezeigt:

- Beispiel 1: Integration von passiven Dämpfungsstrukturen durch eine Kombination von starren und flexiblen Materialien (Abbildung 5.6 und Abbildung 5.7)
- Beispiel 2: Integration von wärmeabstrahlenden Strukturen durch eine lokale Verwendung elektrisch leitfähiger Materialien (Abbildung 5.8 und Abbildung 5.9)

Die Grundlage für die Aufbereitung der Wissensinhalte bilden die in den Abschnitten 4.1 und 5.2 definierten Bedarfe sowie experimentelle Untersuchungen. Die Darstellung erfolgt in Form von Karten (vgl. [Ric18; Sch19; Wat19c]), welche sowohl die Identifikation geeigneter Lösungsprinzipien der MMM als auch die Entwicklung von Lösungskonzepten unter Berücksichtigung AM-spezifischer Besonderheiten unterstützen. In den Prinzipienkarten sind noch keine material-, prozess- oder geometrieabhängigen quantitativen Richtwerte enthalten. Deren Ermittlung wird anhand experimenteller Untersuchungen in den Abschnitten 7.1 und 7.2 beschrieben.

Um eine Beurteilung der Eignung des Konstruktionsprinzips für die jeweilige technische Problemstellung zu erleichtern, werden auf der ersten Seite der Prinzipienkarte die Funktionsweise bzw. der zugrundeliegende physikalische Effekt erläutert und eine Zuordnung zu konstruktiven Zielstellungen aufgezeigt. Die Übertragbarkeit auf den jeweiligen Anwendungsfall wird durch eine Illustration einer generellen Umsetzbarkeit mittels MMM und einer beispielhaften Anwendung unterstützt. Die Anwendungsbeispiele sind bewusst allgemein und kontextunabhängig gehalten, um Vorfixierungen zu vermeiden. Im Fall der Integration von Dämpfungsstrukturen mit der Methode der ASL ist z.B. eine Integrationsmöglichkeit in eine Platte gezeigt (Abbildung 5.6).



Abbildung 5.6: Prinzipaufbereitung Beispiel 1 – Teil 1 (basierend auf [Rot17; Wat19c])

Die zweite Seite umfasst prinzipispezifische geometrie- und prozessbezogene Stellhebel sowie allgemein gehaltene konstruktive Hinweise (siehe Abschnitt 5.2). Dies erlaubt einerseits eine gezielte Berücksichtigung AM-spezifischer Gestaltungsmöglichkeiten in der Entwicklung von Lösungskonzepten. Andererseits wird durch die Gestaltungshinweise eine realistische Einschätzung der technischen Umsetzbarkeit forciert, woraus sich u.a. erste Erkenntnisse hinsichtlich der Festlegung der Bauteilgeometrie sowie der Produktarchitektur ableiten lassen. In Bezug auf Beispiel 1 (Abbildung 5.7) werden u.a. Hinweise zu den bestehenden Wechselwirkungen zwischen Bauteilorientierung, Auflösung und mechanisch-technologischen Eigenschaften aufgezeigt sowie die Wichtigkeit der Berücksichtigung der Materialkompatibilität thematisiert. Zudem werden Möglichkeiten im Hinblick auf die Geometriegestaltung und eine prozessparameterspezifische Anpassung der Biegesteifigkeit u.a. durch die Rasterwinkelorientierung beschrieben.

Integration von passiven Dämpfungsstrukturen durch eine Kombination von starren und flexiblen Materialien		P02
<b>AM-spezifische Stellhebel zur Beeinflussung des Konstruktionsprinzips</b>		
<u>Form des Akustischen Schwarzen Lochs</u> Die Form kann in Abhängigkeit zum jeweiligen Anwendungsfall variiert werden, wobei die Höhe des auslaufenden Endes minimal sein sollte. Dies ermöglicht u.a. eine Einkapselung der Dämpfungsstruktur, sodass die äußere Bauteilgestaltung nicht beeinflusst wird.	<u>Variation der Formfunktion</u> 	
<u>Nutzen der Anisotropie der mechanisch-technologischen Eigenschaften</u> Die Wirksamkeit der Maßnahme steigt mit dem Steifigkeitsunterschied zwischen der Bauteilstruktur und dem Teilquerschnitt. Die Biegesteifigkeit der Bauteilstruktur kann dabei einerseits über die Materialauswahl und die Bauteilorientierung sowie andererseits über die Geometrie und die Wahl der Prozessparameter (u.a. Rasterwinkel, Flussrate, Extrusionstemperatur) beeinflusst werden. Bei faserverstärkten Materialien ist infolge der Faserorientierung der Anstieg entlang der Extrusionsstränge besonders hoch.		
<b>Allgemeine konstruktive Hinweise in Bezug auf die technische Umsetzbarkeit</b>		
<u>Bauteilorientierung und Wahl der Schichthöhe</u> Durch die Bauteilorientierung und die gewählte Schichthöhe wird die Form des ASL in Abhängigkeit von der minimalen Auflösung an die definierte Formfunktion angenähert. Die Orientierung und die Schichthöhe wirken sich zudem auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften (u.a. Biegesteifigkeit) aus. Um die Form möglichst exakt abzubilden, sollte die Schichthöhe so gering wie möglich gewählt werden.	<u>Treppenstufeneffekt</u> 	
<u>Berücksichtigung der Materialkompatibilität</u> Bei der Integration einer dämpfenden Struktur muss zwingend eine ausreichend hohe Verbundhaftung zwischen den zu kombinierenden Materialien vorherrschen. Eine Einkapselung des ASL wirkt einer Ablösung entgegen. Als Maßnahmen zur Steigerung der initialen Verbundhaftung kann z.B. eine Plasmavorbereitung durchgeführt werden, wohingegen eine formschlüssige Verbindung aufgrund des Funktionsprinzips technisch nicht umsetzbar ist.		

**Abbildung 5.7:** Prinzipaufbereitung Beispiel 1 – Teil 2 (basierend auf [Rot17; Rot18; Wat19c])

Beispiel 2 zeigt die lokale Integration wärmeabstrahlender Funktionsstrukturen unter Nutzung des Effekts der Widerstandserwärmung. Als Beispiel ist eine Flächenheizung gewählt worden, wobei als Isolator ein Material mit thermochromen Eigenschaften fungiert (Abbildung 5.8). Durch das Aufzeigen dieser Funktionserweiterung im Hinblick auf die Realisierung thermisch aktivierter optischer Funktionen (z.B. Informationen, Signale oder Designelemente) wird der Produktentwickler zur Integration zusätzlicher Funktionen bzw. der vielseitigen Möglichkeiten der MMB inspiriert.

In Abbildung 5.9 sind die konstruktiven Möglichkeiten in Bezug auf die Einstellbarkeit des elektrischen Widerstands und somit zur Realisierung lokal variabler Oberflächentemperaturen aufgezeigt. Mittels additiver Fertigung kann die Einstellung des elektrischen Widerstands sowohl über die Festlegung der Geometrie als auch die Wahl der Prozessparameter erfolgen, wodurch sich vielfältige konstruktive Möglichkeiten ergeben. Dieses Potenzial ist am Beispiel einer Flächenheizung mit Segmenten unterschiedlicher Oberflächentemperaturen demonstriert.

Die konstruktiven Hinweise beziehen sich im Wesentlichen auf abzustützbare Bereiche, Auswirkungen der Bauteilorientierung auf die resultierende elektrische Leitfähigkeit sowie die Kontaktierung und die Materialauswahl. Zur Integration wärmeabstrahlender Strukturen sind zudem

Empfehlungen zur Schichtverbundgestaltung im Hinblick auf eine formschlüssige Verbindung aufgeführt. So kann eine robuste Integration der Funktionsfläche trotz der dauerhaften Beanspruchung infolge des Erwärms und abschließenden Abkühlens aufgrund der unterschiedlichen materialspezifischen Wärmeausdehnungen realisiert werden. Die Möglichkeiten der Schichtverbundgestaltung bei der MMM sind in Kapitel 6 beschrieben.

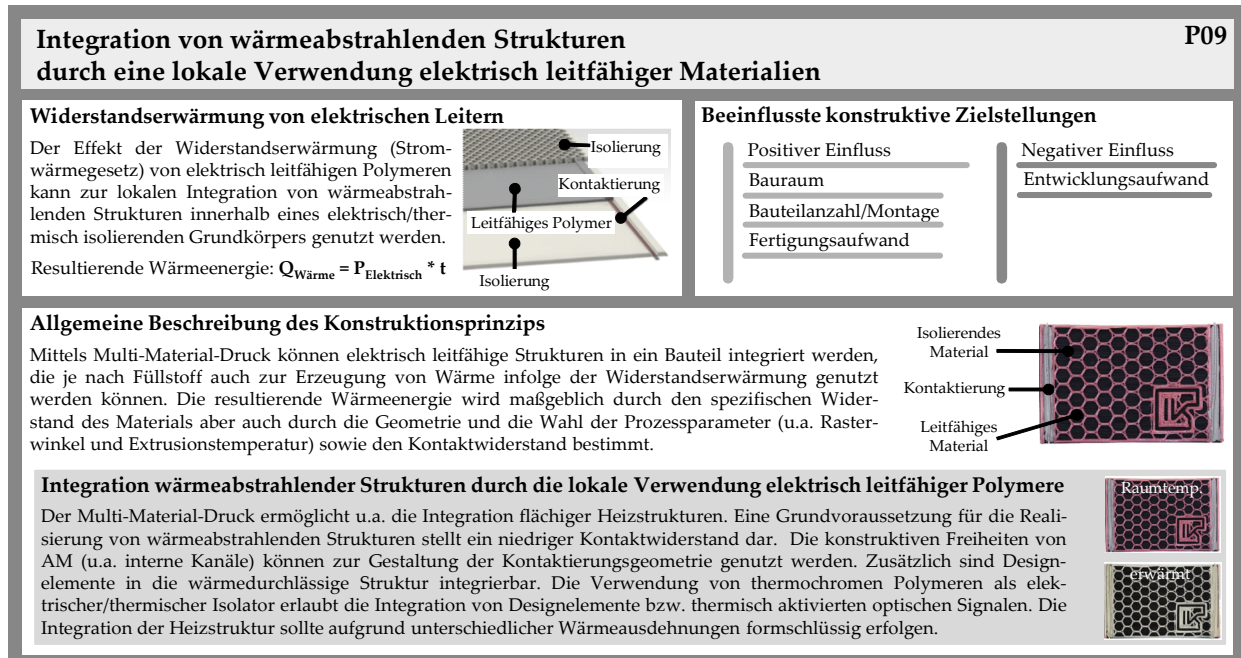


Abbildung 5.8: Prinzipaufbereitung Beispiel 2 – Teil 1 (basierend auf [Wat17a; Wat19a])



Abbildung 5.9: Prinzipaufbereitung Beispiel 2 – Teil 2 (basierend auf [Wat19a])

Eine Auswahl an identifizierten Konstruktionsprinzipien ist in Anhang A.1 in Tabelle A.1 aufgeführt. Eine Einordnung der Prinzipien wird in Tabelle A.2 vorgenommen.

## 5.4 Integration der Wissensbereitstellung für den Konzeptionsprozess

Eine zentrale Herausforderung für die Entwicklung alternativer Lösungskonzepte unter Berücksichtigung der neuen konstruktiven Freiheiten von AM stellt die Integration der Wissensbereitstellung in den Produktentwicklungsprozess dar [Kum16; Kum17a; Ric18; Wat19c]. Nachfolgend wird daher ein Vorgehen zur methodischen Unterstützung des Konzeptionsprozesses durch die Bereitstellung von AM-spezifischem Wissen anhand von Workshops im akademischen und industriellen Kontext untersucht. Das generelle Vorgehen innerhalb der Workshops umfasst die folgenden drei Schritte (siehe [Kum17a; Kus19; Ric18; Sch19; Wat17b]):

1. *Abstraktion der technischen Problemstellung* durch die Verwendung von Produktmodellen (u.a. Funktionsstrukturen und Module Interface Graphs) und Definition der Zielstellung
2. *Generierung von Lösungsideen bzw. Identifikation von AM-spezifischen Lösungsprinzipien* (u.a. unterstützt durch Methoden wie die Walt-Disney-Methode [Kum17a] oder die Methode der Synektik [Wat17b] sowie AM-spezifische Hilfsmittel wie z.B. eine Potenzialsystematik [Kum17a; Kum18], AM-Modelle [Wat16; Wat17b] oder Prinzipienkarten [Kus19; Sch19])
3. *Entwicklung von Lösungskonzepten* durch eine Konkretisierung der Lösungsideen (u.a. gefördert durch die Verwendung von AM-Modellen [Wat16; Wat17b], Prinzipienkarten [Kus19; Sch19] und allgemeinen Konstruktionshinweisen [Kum17a])

Das Vorgehen ist an das DfAM-Vorgehensmodell nach Kumke et al. (2016) [Kum16] (siehe Abbildung 2.7) angelehnt, wobei innerhalb der Workshops primär die Schritte zwei bis fünf sowie das Modul F durchlaufen werden. Hierdurch wird die Integration der Wissensbereitstellung in den bestehenden Produktentwicklungsprozess erleichtert. Die genutzten Methoden und Hilfsmittel umfassen adaptierte Konstruktionsmethoden sowie selbstentwickelte Hilfsmittel zur Aufbereitung und Bereitstellung von opportunistischem und restriktivem AM-Wissen. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Untersuchung der Eignung des beschriebenen methodischen Vorgehens und der verknüpften Wissensbereitstellung zur Unterstützung des Konzeptionsprozesses im Kontext der additiven Fertigung. Daher werden die eingesetzten Methoden und Hilfsmittel nicht näher beschrieben, da diese in den jeweiligen Publikationen zu finden sind.

### 5.4.1 Strukturierung und Aufbau der Workshops

Der beschriebene grundsätzliche Ablauf der einzelnen Workshops wird für den akademischen und dem industriellen Anwendungsfall nicht geändert, jedoch wird der Umfang und die Art der technischen Problemstellung variiert. Die Dauer beträgt abhängig von der Komplexität der technischen Problemstellung und dem Umfang der Aufgabenstellung zwischen 90 [Wat17b] und 180 Minuten [Kus19; Sch19]. Die gewählten Beispiele sind aus dem Bereich der Fahrzeugtechnik gewählt und befassen sich bspw. mit der Umgestaltung von Bauteilen bzw. -gruppen innerhalb des Fahrzeuginterieurs wie der Mittelkonsole oder Sitzstrukturen. Die Teilnehmenden – Konstrukteure und Designer in den industriellen Workshops sowie Doktoranden und Studierende in den akademischen Workshops – werden im Vorfeld so ausgewählt, dass eine Mischung in Bezug auf die Vorkenntnisse im Bereich des DfAM gegeben ist. Hierdurch können die Anwendbarkeit des Vorgehens und der Nutzen der Wissensbereitstellung differenziert betrachtet werden. Zu Beginn der Workshops wird jeweils eine kurze Einführung in die additive Fertigung mit Fokus auf die neuen konstruktiven Freiheiten gegeben.

Das primäre Ziel der Workshops ist die Untersuchung der Nutzung der AM-spezifischen konstruktiven Möglichkeiten innerhalb der Bauteilkonzeption. Die Wissensbereitstellung in Bezug auf Gestaltungsmöglichkeiten wird in diesem Fall nicht auf die MMM beschränkt, um den betrachteten Lösungsraum nicht zu stark einzuschränken. Der Einsatz der Methoden und Hilfsmittel zielt auf das Lösen von Denkbarrieren innerhalb der Konzeptentwicklung ab und wird mit der Bereitstellung von AM-spezifischem Wissen gekoppelt [Kum17a; Wat17b]. Die Art des bereitgestellten Wissens – gegliedert nach opportunistisch und restriktiv – ist dabei von der gewählten Methode sowie dem jeweiligen Schritt innerhalb des Konzeptionsprozesses abhängig. Die Walt-Disney-Methode erlaubt bspw. infolge der unterschiedlichen Standpunkte (Träumer, Realist und Kritiker), die bei der Anwendung eingenommen werden, eine phasenabhängige Kopplung mit opportunistischem bzw. restriktivem Wissen [Kum17a]. Der Einsatz von additiv gefertigten physischen Modellen dient weiterhin der Anregung der Kreativität innerhalb der Ideengenerierung (reale Anwendungsbeispiele). Speziell für unerfahrenere Workshopteilnehmende auf dem Gebiet des DfAM wird hierdurch das Einschätzen von verfahrensspezifischen Grenzen erleichtert [Sch19; Wat17b].

Die Workshopergebnisse bzw. die entwickelten Lösungskonzepte werden u.a. im Hinblick auf die Erfüllung der Aufgabenstellung, auf den Bezug zu den Potenzialen von AM und deren zielgerichteter Nutzung sowie auf eine generelle technische Umsetzbarkeit evaluiert (vgl. [Kum17a]). Zudem wird das generelle Vorgehen innerhalb des Workshops und die Bereitstellung von Methoden und Hilfsmitteln durch die Workshopteilnehmende bewertet. In Abschnitt 5.4.2 werden nachfolgend die relevanten Ergebnisse der Workshops zur Anwendbarkeit des Vorgehens und zum Nutzen der Wissensbereitstellung im Hinblick auf die Unterstützung der Entwicklung von Lösungskonzepten unter Berücksichtigung der konstruktiven Potenziale von AM beschrieben.

#### 5.4.2 Ergebnisse der Workshops

Zu den entwickelten Lösungskonzepten der Workshops zählen u.a. eine an die Anthropometrie anpassbare *Armlehne* aus einem flexiblen Material, welche eine Ladefunktion für Smartphones integriert [Wat17b], eine multifunktionale *Mittelkonsole* mit variabler Aufteilung der Stauräume und integriertem Bedienfeld [Kum17a] sowie eine *Sitzstruktur* mit einem adaptiven Federsystem zur Einstellung der Federkraft und einem integrierten Lüftungssystem mit passiv öffnenden Ventilkappen [Kus19]. Dies zeigt, dass neben Gestaltvariationen durch das Vorgehen, die Methodenutzung und die Wissensbereitstellung auch alternative Wirkprinzipien innerhalb des Konzeptionsprozesses Anwendung finden und auf diese Weise Prinzipvariationen in der Lösungsentwicklung Berücksichtigung finden können.

Die Evaluationsergebnisse der Workshops zeigen grundsätzlich, dass die Teilnehmenden das gewählte Vorgehen in Kombination mit der AM-spezifischen Wissensbereitstellung im Hinblick auf die Berücksichtigung der neuen Gestaltungsmöglichkeiten in der Bauteilkonzeption weitestgehend als hilfreich empfinden [Kum17a; Kus19; Ric17; Ric18; Sch19; Wat17b]. Zudem werden auch diejenigen Workshopteilnehmenden ohne tiefergehendes Vorwissen im Bereich der additiven Fertigung dazu befähigt, die Besonderheiten von AM in der Entwicklung von Lösungskonzepten zu berücksichtigen. Vorwissen erlaubt jedoch eine gezieltere Nutzung der Gestaltungsmöglichkeiten und unterstützt die Beurteilung der Kompatibilität einzelner Teillösungen untereinander sowie die Einschätzung der generellen technischen Umsetzbarkeit der entwickelten Lösungskonzepte [Kum17a].

Eine Abstraktion der technischen Problemstellung erleichtert weiterhin die Erweiterung des betrachteten Lösungsraums in Bezug auf Nachbarsysteme und eröffnet so weitere Möglichkeiten zur



Integration von Funktionen [Ric17; Ric18]. Dieser Schritt fällt den Teilnehmenden im akademischen Umfeld leichter, da u.a. Vorfixierungen aufgrund der geringeren Berufserfahrung weniger stark ausgeprägt sind [Kus19]. Dies kann sich negativ auf den Innovationsgrad der entwickelten Lösungskonzepte bspw. in Bezug auf Prinzipvariationen auswirken [Kus19; Sch19]. Mangelndes Vorwissen im Bereich des DfAM kann teilweise durch die Bereitstellung von Wissen in Bezug auf neuartige Lösungsprinzipien kompensiert werden, sodass die Entwicklung neuartiger, innovativer Lösungen ermöglicht wird [Kum17a; Wat17b].

Auf der Basis der Workshopergebnisse und der Befragung der Teilnehmenden lassen sich in Bezug auf die Wissensbereitstellung zur Unterstützung der Bauteilkonzeption folgende Ergebnisse festhalten:

- Die *Abstraktion der technischen Problemstellung* unter Verwendung etablierter Produktmodelle ermöglicht einen systematischen Zugriff auf spezifische AM-Potenziale (z.B. über Prinzipienkarten [Kus19; Ric17; Ric18; Sch19]) und erleichtert so deren zielgerichtete Nutzung in der Entwicklung von Lösungskonzepten. Zudem wird hierdurch eine Erweiterung des Lösungs- bzw. Betrachtungsraums unterstützt [Ric17; Ric18].
- Die Kombination von bekannten *Methoden* und die Bereitstellung von *spezifischem Wissen* erleichtert die Entwicklung von Lösungskonzepten, wobei eine Illustration der Gestaltungsmöglichkeiten anhand von realen Anwendungen und speziell physische AM-Modelle die Inspiration fördern und so die Entwicklung neuartiger Lösungen forcieren. [Kum17a; Wat17b].
- Die *Wissensbereitstellung* sollte sowohl Informationen über die konstruktiven *Freiheiten* (neuartige Wirkprinzipien und Gestaltungsmöglichkeiten) als auch über grundlegende *Grenzen* der additiven Fertigung (z.B. Auflösung und Anisotropie) beinhalten, um so die Konkretisierung der Lösungsideen bzw. der identifizierten Lösungsprinzipien zu realistischen Lösungskonzepten zu erleichtern [Kum17a; Kus19; Wat17b] (vgl. [Pra18a; Zhu17a]). Die Bereitstellung von spezifischen Informationen über Restriktionen oder auch Gestaltungsmöglichkeiten kann jedoch zu einer Überforderung führen, sofern der Grad des Vorwissens gering ist [Kum17a].

Die Workshopergebnisse zeigen im Allgemeinen eine Eignung des in den Workshops angewendeten Vorgehens in Kombination mit der Bereitstellung von Wissen für die schnelle Generierung von einer Vielzahl an Lösungskonzepten auf, auch wenn das Vorwissen in Bezug auf die konstruktiven Freiheiten und Grenzen der additiven Fertigung gering ausgeprägt ist. Der Konkretisierungsgrad der entwickelten Konzepte ist jedoch teilweise rudimentär, sodass die Qualität im Hinblick auf eine gezielte Potenzialnutzung und eine Berücksichtigung der generellen technischen Umsetzbarkeit gering ist [Kum17a; Ric17]. Dies liegt einerseits in der zeitlichen Begrenzung innerhalb der Workshops begründet [Kus19; Sch19; Wat17b]. Andererseits hängt dies mit der Beschränkung des bereitgestellten Wissens auf geometriebezogene Stellhebel und Konstruktionshinweise zusammen. Weiterhin werden die spezifischen Freiheiten der MMM zwar generell in der Entwicklung der Lösungskonzepte betrachtet (u.a. in dem Konzept der Sitzstruktur [Kus19]), jedoch fällt eine realistische Beurteilung der technischen Umsetzbarkeit aufgrund der Komplexität der Zusammenhänge (u.a. Materialkompatibilität) sowie eine zusätzliche Nutzung prozesseitiger Hebel schwer. Dies bekräftigt den Bedarf einer gezielten Wissensbereitstellung für die MMM, um diese Potenziale innerhalb des Konzeptionsprozesses realistisch nutzbar zu machen.

Es gilt einzuschränken, dass aufgrund der Anzahl der durchgeführten Workshops und der Anzahl der Teilnehmenden (zwischen 7 und 14 Personen) die Ergebnisse lediglich Tendenzen für die Eig-

nung des Vorgehens und der Art der Wissensbereitstellung aufzeigen. Zudem ist die Anwendbarkeit ausschließlich im Bereich der Automobilindustrie und im akademischen Umfeld evaluiert worden.

## 5.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel sind ausgewählte Möglichkeiten der Identifikation von Konstruktionsprinzipien für die MMM dargestellt und exemplarisch angewendet worden. Auf der Grundlage einer literaturbasierten Definition der Wissensinhalte sowie deren Repräsentationsform sind beispielhaft zwei unterschiedliche Konstruktionsprinzipien ausgearbeitet worden. Die gezielte Wissensbereitstellung zur Unterstützung der Entwicklung von neuartigen Lösungskonzepten im Kontext der additiven Fertigung ist in Workshops im akademischen und industriellen Umfeld erprobt worden, wobei deren generelle Eignung festgestellt werden konnte. Dies bildet die Grundlage für die Wissensbereitstellung von Konstruktionsprinzipien innerhalb der Produktentwicklung und die prototypische Umsetzung des Wissenssystems (Abschnitt 7.3).

Die Ergebnisse zeigen zudem, dass für die Entwicklung von alternativen Lösungskonzepten unter Berücksichtigung des Potenzials der MMM neben der Bereitstellung spezifischer Lösungsprinzipien auch eine Unterstützung der Schichtverbundgestaltung zur Beurteilung der technischen Umsetzbarkeit (Kapitel 6) erforderlich ist. Die Ermittlung quantitativer Kennwerte ist weiterhin für eine Beurteilung der kontextabhängigen Eignung (Abschnitte 7.1 und 7.2) und zur Verbesserung der Qualität der generierten Lösungskonzepte unabdingbar. Die entsprechenden Inhalte werden in den nachfolgenden Kapiteln beispielhaft anhand experimenteller Untersuchungen für ausgewählte Prinzipien und Materialien bzw. Materialkombinationen erarbeitet.



## 6 SCHICHTVERBUNDGESTALTUNG

Im Kontext der Multi-Material-Materialextusion bildet die Kompatibilität der in einem Bauteil zu verarbeitenden Materialien eine Grundvoraussetzung für die technische Umsetzung von Multi-Material-Bauweisen. Somit stellt der Schichtverbund die Basis für eine Integration materialspezifischer Funktionen dar. Hieraus leiten sich folgende Fragestellungen bezüglich einer spezifischen Wissensbereitstellung im Hinblick auf die Schichtverbundgestaltung ab:

- Wie kann die Ermittlung von Verbundfestigkeiten unterstützt werden (Abschnitt 6.1)?
- Welche Parameter bzw. Faktoren beeinflussen die Verbundfestigkeit (Abschnitt 6.2)?
- Welche Maßnahmen zur Verbesserung der Verbundfestigkeit bestehen (Abschnitt 6.3)?

Forster (2015) [For15] und Monzón et al. (2015) [Mon15] heben generell die Wichtigkeit der Erarbeitung spezifischer Standards zur Charakterisierung mechanisch-technologischer Eigenschaften additiv gefertigter Bauteile bzw. Strukturen hervor, da die Anwendbarkeit von bestehenden Normen und Prüfkörpern nur bedingt möglich ist. Zudem wird das Potenzial der Verarbeitung mehrerer Materialien in einem Bauteil bisher in der Materialcharakterisierung im Hinblick auf die Ermittlung von Verbundfestigkeiten nicht betrachtet, sodass sich hieraus ein Bedarf an entsprechenden Methoden und Prüfkörpern ableitet [For15]. Erste Anlagenhersteller, wie Ultimaker B.V., stellen zwar Informationen bezüglich der Kompatibilität unterschiedlicher Materialien im Hinblick auf eine Verarbeitung in einer Multi-Material-Bauweise zur Verfügung, geben aber weder die Charakterisierungsmethode an noch werden qualitative oder quantitative Angaben zur Güte des Verbunds gemacht. Darüber hinaus beschränken sich die angegebenen Kompatibilitäten weitestgehend auf die Kombination von verschiedenen Bau- und Stützmaterialien. Lediglich Kombinationen aus starren und flexiblen Materialien (u.a. ABS und TPU) sind als experimentell eingestuft, wobei die technische Umsetzbarkeit nicht weiter spezifiziert wird [Ult19a]. Zur Erweiterung der Wissensbereitstellung um Informationen in Bezug auf Verbundfestigkeiten sowie AM-spezifische Gestaltungsmöglichkeiten, werden nachfolgend die drei Fragestellungen thematisiert.

### 6.1 Charakterisierung der Schichtverbundhaftung

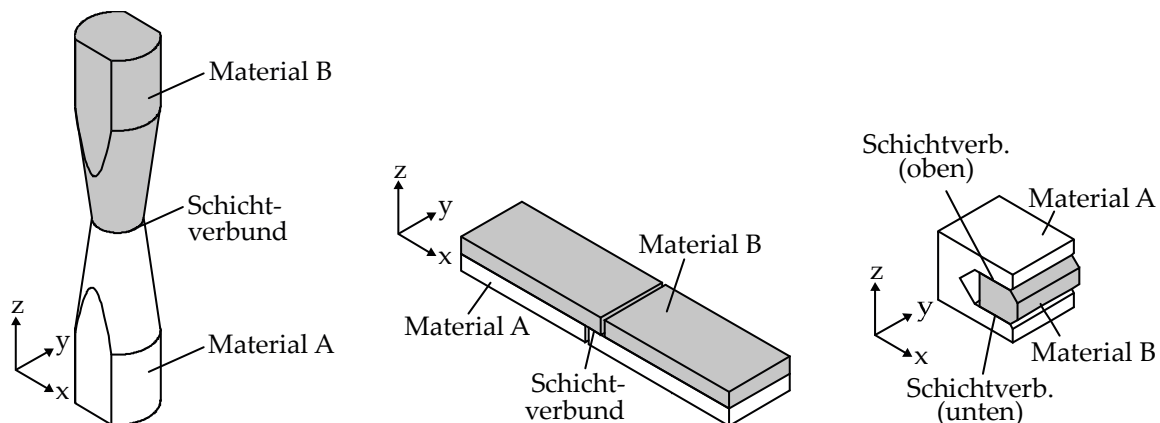
Die Beurteilung der technischen Umsetzbarkeit einer Multi-Material-Bauweise und somit die Integration materialspezifischer Funktionen erfordert grundlegende Informationen über die Güte der Verbundhaftung bzw. die Materialkompatibilität. Dies bildet wiederum die Grundlage für die Schichtverbundgestaltung unter einer gezielten Berücksichtigung der neuen Gestaltungsfreiheiten der MMM im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren. Notwendige Voraussetzung hierfür stellt die Charakterisierung der Schichtverbundfestigkeit zwischen den zu kombinierenden Materialien und somit die Entwicklung geeigneter Prüfkörper dar. Verfügbare Studien untersuchen ausschließlich die Haftkraft zwischen Bau- und Stützmaterialien auf Basis bestehender Prüfstandards [Fis18] oder die resultierende Festigkeit von additiv gefertigten Multi-Material-Verbünden (z.B. ABS, PLA und HIPS) [Sin19], ohne den Schichtverbund und somit die Verbundfestigkeit zu spezifizieren. Auch DIN EN ISO 17296-3 [DIN16b] enthält nur allgemeine Empfehlungen und Ratschläge zur Verbesserung der Anwendung von Prüfkörpern auf die additive Fertigung. Diese basieren im Wesentlichen auf Standards und Normen aus der Kunststofftechnik. AM-spezifische Standards werden derzeit im Rahmen des Arbeitskreises der *ISO/TC 261 (additive manufacturing)* [ISO19] entwickelt.

### 6.1.1 Entwicklung von Prüfkörpern zur Ermittlung der Verbundhaftung

Die Grundlage für die Entwicklung von Prüfkörpern zur Charakterisierung der Verbundhaftung bildet eine Analyse bisheriger Studien zur Ermittlung mechanisch-technologischer Eigenschaften im Kontext der Materialextrusion. Das Ergebnis der Analyse ist in Tabelle B.1 (Anhang B.1) dargestellt. In der Prüfkörperentwicklung wird sowohl zwischen der Belastungsart als auch der Materialkombination hinsichtlich der Elastizität der einzelnen Materialien (starr/flexibel) differenziert [Fre19; Wat18]. Der entstehende Schichtverbund bei der MMM kann mit dem Verbund beim Kunststoffschweißen sowie – mit Einschränkungen – mit dem Verbund beim Kleben und Diffusionskleben verglichen werden, da die Mechanismen der Diffusion, der Adsorption, der Polarität und der mechanischen Adhäsion die Verbundhaftung bestimmen [DIN03; Wat18] (siehe auch Abschnitt 2.2.2). Die Prüfkörperentwicklung erfolgt auf Basis bestehender Normen und Standards im Bereich dieser Füge Technologien unter Berücksichtigung der in Tabelle B.1 analysierten Studien.

Für die Kombination aus zwei starren Materialien wird je eine Prüfkörpergeometrie für die Untersuchung der Verbundhaftung in Abhängigkeit von Zug-, Zugscher- und Druckscherbelastungen entworfen, welche in Abbildung 6.1 dargestellt sind. Der Entwurf der einzelnen Prüfkörpergeometrien basiert auf den folgenden Normen [Wat18]:

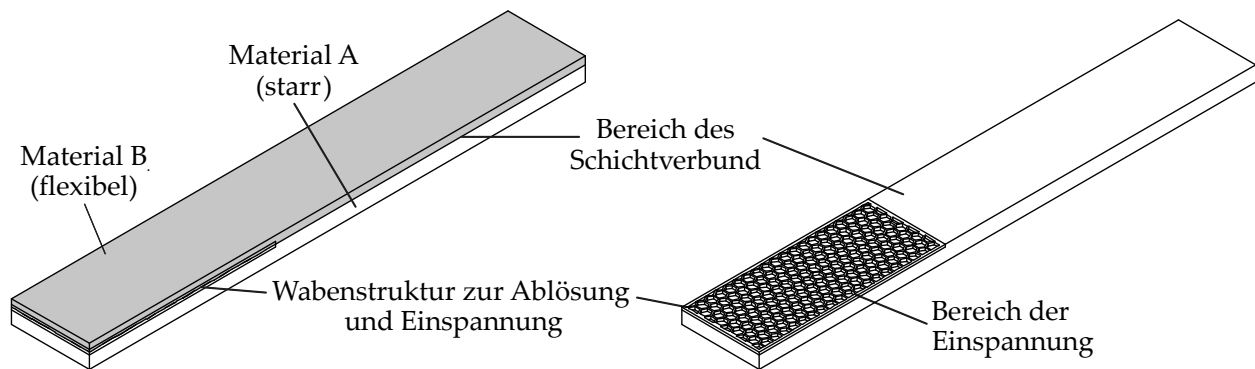
- *Zugbelastung*: DIN EN 12814-2 [DIN00], DIN EN 15870 [DIN09b]
- *Zugscherbelastung*: DIN EN 14869-2 [DIN11], DIN EN 1465 [DIN09a]
- *Druckscherbelastung*: DIN EN ISO 13445 [DIN06a]



**Abbildung 6.1:** Isometrische Ansicht der entwickelten Prüfkörper zur Charakterisierung der Verbundhaftung für die Zug- (links), Zugscher- (Mitte) und Druckscherbelastung (rechts) (angelehnt an [Wat18])

Die Prüfkörper sind so gestaltet, dass für die Fertigung kein Stützmaterial erforderlich ist und somit kein weiterer Extruder benötigt wird. Kleinere Distanzen in Bauebene können hingegen überbrückt werden, ohne zusätzliches Stützmaterial zu erfordern. Die Ausrichtung stellt gleichzeitig die vorgeschlagene Bauteilorientierung dar. Die Abmessungen der Prüfkörper sind in Abbildung B.1 aufgeführt. Bei deren Festlegung werden Einspannlängen sowie Wandstärken und Höhen so dimensioniert, dass auftretende Kipp- und Biegemomente während der Prüfung möglichst gering sind. Die Prüfkörper bilden sowohl die Grundlage für die Identifikation von Einflussfaktoren auf die Verbundhaftung als auch die anschließende Ableitung von Regeln zur Schichtverbundgestaltung bzw. zur Ableitung von Maßnahmen zur Steigerung der Verbundfestigkeit [Wat18].

Für die Kombination aus starren und flexiblen Materialien wird ein weiterer Prüfkörper entwickelt, der die Ermittlung der Verbundfestigkeit unter Schälbelastung ermöglicht (siehe Abbildung 6.2). Die Festlegung der Prüfkörpergeometrie erfolgt auf Basis von DIN EN 1464 [DIN10]. Um eine Einspannung der Prüfkörper im Rollenschälversuch zu ermöglichen, ist eine teilweise Separierung der kombinierten Materialien nach dem Fertigungsprozess erforderlich. Zur Erleichterung dieser Trennung ist im vorderen Teil des Prüfkörpers beidseitig eine Wabenstruktur eingebracht. Die Abmessungen des Prüfkörpers sind in Abbildung B.1 (Anhang B.1) dargestellt.



**Abbildung 6.2:** Isometrische Ansicht des entwickelten Prüfkörpers zur Charakterisierung der Verbundhaftung unter Schälbelastung (angelehnt an [Fre19])

### 6.1.2 Validierung der Prüfkörper anhand von experimentellen Untersuchungen

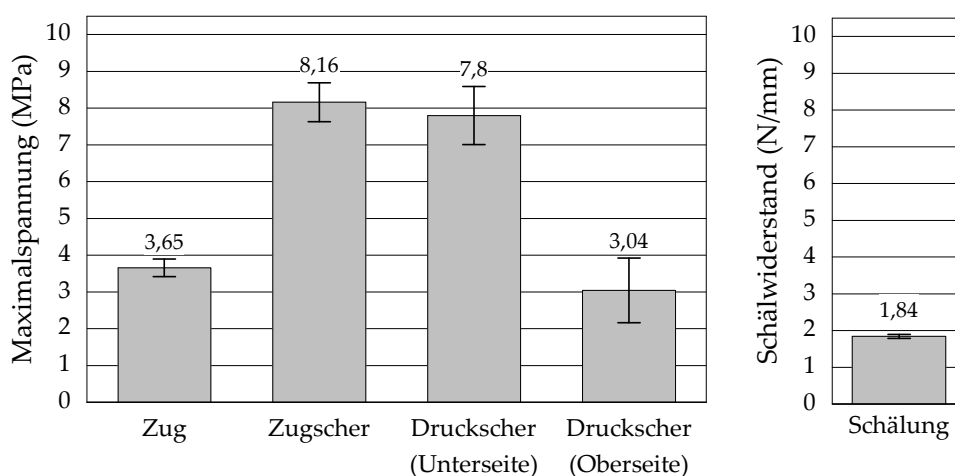
Zur Validierung der Eignung der Prüfkörper für die Ermittlung der Verbundhaftung werden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Für die Prüfkörper (a) bis (c) wird eine Kombination aus zwei starren Materialien, PLA und ABS, gewählt, wohingegen für den Prüfkörper (d) eine Kombination aus PLA (starr) und TPU (flexibel) verwendet wird (siehe Tabelle 6.1). Die zur Probenherstellung genutzten Anlagen und Materialien sowie die verwendeten Prozessparametersätze und Prüfbedingungen sind in Tabelle 6.1 aufgeführt. Es gilt anzumerken, dass für die Fertigung des Prüfkörpers (d) eine andere Anlage als für die Herstellung der Prüfkörper (a) bis (c) eingesetzt wird. Dies liegt darin begründet, dass die Verarbeitung des TPU aufgrund der geringen Biegesteifigkeit mittels Direktextruder reproduzierbarer ist.

**Tabelle 6.1:** Übersicht der Verfahrensparameter und Prüfbedingungen, gegliedert nach Prüfkörpertyp bzw. Materialkombination (basierend auf [Wat18])

	Variationsparameter	Prüfkörper (a) bis (c)	Prüfkörper (d)
<b>Fertigungs- maschine</b>	Anlage	Ultimaker 3	German RepRap X400
	Extrudertyp	Bowdenextruder	Direktextruder
<b>Material</b>	Kombination	PLA/ABS	PLA/TPU (NinjaFlex®)
	Farbe	weiß/blau	schwarz/weiß
<b>Verfahrens- parameter</b>	Bauplattformtemperatur	60 °C	60 °C
	Düsentemperatur	215/245 °C	215 °C/230 °C
	Schichthöhe	0,2 mm	0,2 mm
	Linienbreite	0,4 mm	0,4 mm
	Füllmusterorientierung	±45°	±45°
	Füllgrad	100%	100%
	Konturlinienanzahl	2	2
	Verfahrensgeschwindigkeit	50/50 mm/s	50/20 mm/s
<b>Prüfung</b>	Anlage	Instron 5966	zwickiLine
	Kraftmessdose	10 kN	1 kN
	Anzugsdrehmoment/Vorkraft	12 Nm/-	-/5 N
	Prüfgeschwindigkeit	2 mm/min	50 mm/min

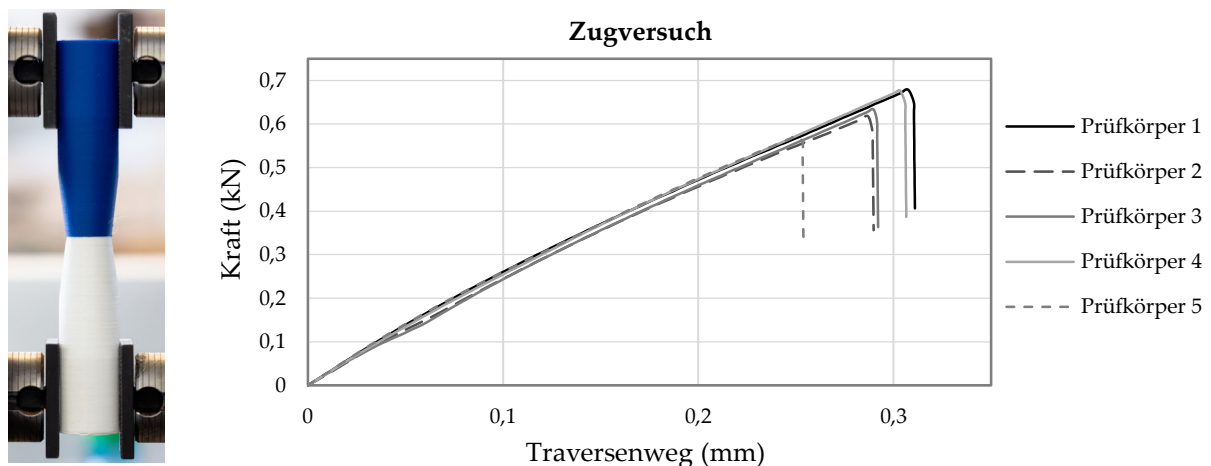
Zur Sicherstellung vergleichbarer Prozessrandbedingungen werden die Proben nacheinander gefertigt, wobei die Umgebungsbedingungen mit einer Raumtemperatur von  $23 \pm 1$  °C und mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 45-50% konstant gehalten werden. Vor der Verarbeitung der Materialien werden diese individuell getrocknet und während der Fertigung in einer Art Exsikkator gelagert, um eine Wasseraufnahme zu minimieren. Die Trocknungszeit der einzelnen Materialien beträgt jeweils vier Stunden, wobei die Temperatur für das PLA auf 45 °C, für das TPU auf 50 °C und für das ABS auf 60 °C festgesetzt wird. Die Bauteilorientierung wird in Anlehnung an Abbildung 6.1 und Abbildung 6.2 festgelegt (Material A: PLA; Material B: ABS/NinjaFlex®), da Vorversuche gezeigt haben, dass durch die Wahl dieser Reihenfolge eine höhere Verbundfestigkeit erreicht wird. Dies resultiert u.a. aus der höheren Extrusionstemperatur von ABS in Kombination mit der geringeren Erweichungstemperatur von PLA (vgl. Diffusionstheorie, Abschnitt 2.2.2).

Abbildung 6.3 zeigt eine Übersicht der Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen, wobei neben der Maximalspannung bzw. dem Schälwiderstand die jeweiligen Standardabweichungen angegeben sind (siehe [Fre19; Wat18]). Die erreichbaren Maximalspannungen der Druckscherprüfung sind zweigeteilt aufgeführt, da der Prüfkörper im unteren und im oberen Schichtverbund separat versagt. Dies liegt u.a. an der geänderten Materialreihenfolge sowie den unterschiedlichen Glasübergangs- und Extrusionstemperaturen, sodass der obere Schichtverbund durch die geringere Extrusionstemperatur von PLA eine geringere Verbundhaftung aufweist. Die auftretenden Standardabweichungen der einzelnen Prüfkörper demonstrieren eine generelle Eignung der entwickelten Prüfkörpergeometrien für die Charakterisierung der Verbundhaftung in Abhängigkeit von der Art der äußeren Belastung sowie der unterschiedlichen Kombinationen aus starren und flexiblen Materialien. Aufgrund der vergleichsweise geringen initialen Verbundhaftung von PLA und ABS wirken sich Unsicherheiten im Fertigungsprozess (u.a. Kalibrierung oder schwankende Filamentdurchmesser) und in der Prüfung (z.B. Verkippen der Prüfkörper während der Einspannung) stärker auf die resultierende Verbundfestigkeit aus, als dies bei der Kombination von PLA und NinjaFlex® der Fall ist. Bei der Kombination PLA/ABS weisen die Zug- und Zugscherprüfkörper mit 0,24 MPa ( $\approx 6,6\%$ ) bzw. 0,53 MPa ( $\approx 6,5\%$ ) die geringsten Abweichungen auf, wohingegen die Abweichungen bei der Druckscherprüfung an der Unterseite 0,79 MPa ( $\approx 10,1\%$ ) und an der Oberseite 0,40 MPa ( $\approx 10,3\%$ ) betragen [Wat18]. Anhand der Kraft-Weg-Diagramme der einzelnen Prüfungen werden nachfolgend mögliche Ursachen für die Abweichungen diskutiert.



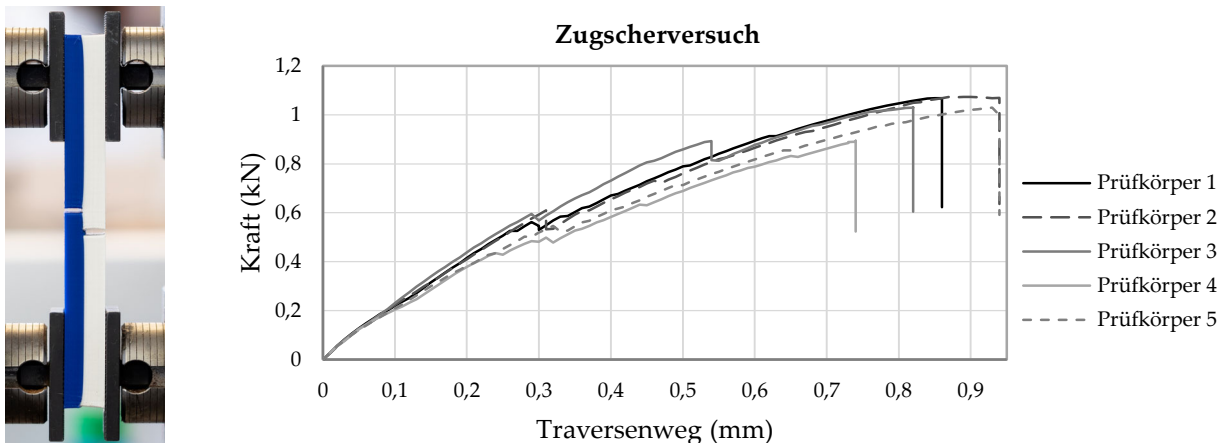
**Abbildung 6.3:** Übersicht der experimentell ermittelten Spannungen bzw. des Schälwiderstands für die unterschiedlichen Prüfkörper mit Angabe der Standardabweichungen (basierend auf [Wat18])

Abbildung 6.4 zeigt das Kraft-Weg-Diagramm des Zugversuchs sowie den dazugehörigen Versuchsaufbau. Die Ausrichtung in der Einspannung entspricht der Orientierung der Prüfkörper während der Fertigung, wobei der weiße Teil aus PLA und der blaue Teil aus ABS hergestellt ist. Die Einspannlänge wird auf 60 mm festgelegt und die Proben mit einem Drehmoment von 12 Nm in der Einspannung festgezogen, um eine Vorschädigung zu vermeiden. Bis auf Prüfkörper 5 liegen die maximal übertragbaren Kräfte im Bereich zwischen 0,62 und 0,68 kN. Das Bruchbild in Abbildung B.2 (a) in Anhang B.1 zeigt kleine Defekte in der Grenzfläche, welche durch überschüssiges Material an den An- bzw. Absatzpunkten entstehen können. Hierdurch könnte bei Prüfkörper 5 ein vorzeitiges Versagen infolge der entstehenden Kerbwirkung initiiert worden sein. Da Prüfkörper 5 im Vergleich zu den anderen Prüfkörpern darüber hinaus keine weiteren Defekte aufweist, könnte auch ein Verkippen beim Einspannen und somit die Einleitung eines zusätzlichen Biegemoments der Grund für die reduzierte Verbundfestigkeit sein [Wat18].



**Abbildung 6.4:** Aufbau und Kraft-Weg-Diagramm des Zugversuchs (vgl. [Wat18])

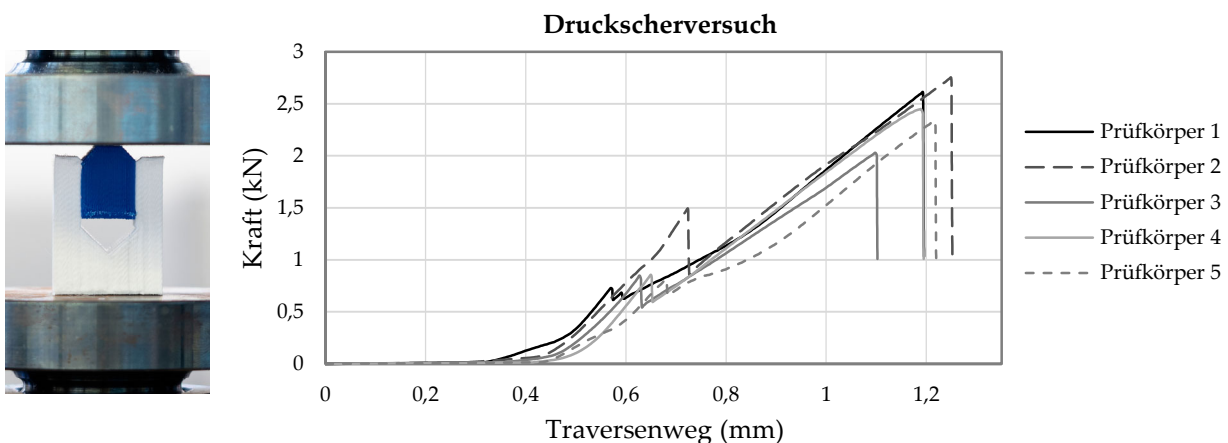
Im Vergleich zum Zugversuch beträgt die Einspannlänge der Zugscherprüfkörper 50 mm. Die Dicke der einzelnen Füge-teile ist mit 6 mm so gewählt, dass ein Aufbiegen des Probekörpers während der Prüfung reduziert und die Einleitung eines zusätzlichen Biegemoments minimiert wird. Der Versuchsaufbau und das Kraft-Weg-Diagramm des Zugscherversuchs sind in Abbildung 6.5 dargestellt. Eine durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungen entstehende Deformation des PLA in der Grenzfläche ist deutlich erkennbar. Da der Schichtverbund im Vergleich zu den Zugprüfkörpern deutlich näher an der beheizten Bauplattform liegt, ist deren Temperatureinfluss stärker und der Widerstand des PLA gegen Verformung reduziert (Wärmeformbeständigkeit). Zudem können durch die Wärmeeinbringung entstehende thermisch induzierte Spannungen innerhalb des Schichtverbunds potenziell abgebaut werden. Abgesehen von Prüfkörper 4 variiert die erreichbare Maximalkraft geringfügig im Bereich von 1,03 bis 1,07 kN. Trotz der geringeren Größe der Grenzfläche liegt die erreichte Maximalkraft deutlich über der der Zugversuche. Auch die Verformung ist signifikant höher als bei den Zugversuchen und entspricht mit 0,9 mm in etwa dem Dreifachen. Das Bruchbild von Prüfkörper 4 (siehe Abbildung B.2 (b)) zeigt im Bereich des Schichtverbunds eine leichte Unterextrusion, was zu einer Reduzierung der Verbundhaftung führen kann. Das Bruchbild von Prüfkörper 3 weist einen Fehler innerhalb der Grenzfläche auf, welcher durch Fadenzug verursacht ist. Dieser Defekt initiiert wahrscheinlich den Kraftabfall bei etwa 0,55 mm. Im Vergleich zum Zugversuch sind in der Grenzfläche der Zugscherprüfkörper deutlich Materialrückstände vom PLA auf dem ABS-Fügeteil zu erkennen. Dies spricht für eine stärkere Verbindung und könnte auf den Einfluss der beheizten Bauplattform zurückzuführen sein [Wat18].



**Abbildung 6.5:** Aufbau und Kraft-Weg-Diagramm des Zugscherversuchs (vgl. [Wat18])

Das Kraft-Weg-Diagramm des Zugscherversuchs weist einen leicht gezackten Verlauf auf, was für eine partielle Ablösung der beiden Materialien spricht. Diese lässt auf eine zusätzliche mechanische Verankerung aufgrund der Oberflächenrauheit schließen, welche der Scherkraft entgegenwirkt. Bei allen Prüfkörpern ist zudem ein charakteristischer Kraftabfall bei etwa 0,3 mm zu erkennen. Dieser leichte Kraftabfall ist wahrscheinlich auf eine Ablösung der beiden Materialien im Bereich der Stirnfläche zurückzuführen, welcher aufgrund der Spaltüberbrückung entsteht. Diese Vermutung wird dadurch gestützt, dass an der Stirnfläche eine Zugbeanspruchung auftritt und sowohl die Kraft ( $\approx 0,6$  kN) als auch der Traversenweg ( $\approx 0,3$  mm) in etwa den Werten aus dem Zugversuch entsprechen [Wat18].

In Abbildung 6.6 ist der Versuchsaufbau der Druckscherprüfung dargestellt, wobei die durch die thermisch bedingte Schrumpfung entstandene Verformung des Probekörpers auf der Unterseite (links) im Vergleich zur Oberseite deutlich erkennbar ist (siehe Bruchbilder in Abbildung B.2 (c)).



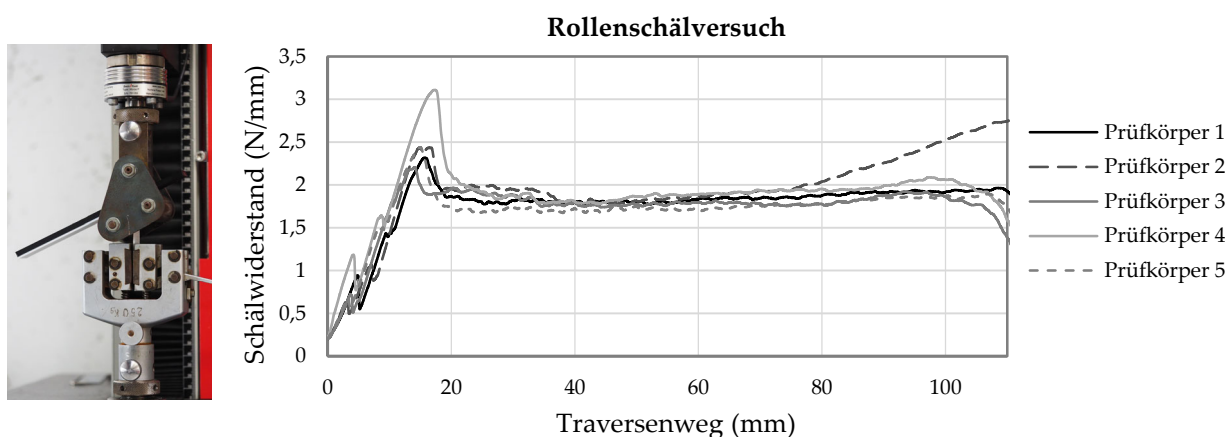
**Abbildung 6.6:** Aufbau und Kraft-Weg-Diagramm des Druckscherversuchs (vgl. [Wat18])

Der Kraftverlauf startet erst bei ca. 0,3 mm, da die Prüfkörper beim Druckscherversuch nicht fest eingespannt werden. Somit entspricht der maximale Weg bis zum Versagen der Proben in etwa dem des Zugscherversuchs ( $\approx 0,9$  mm). Wie in Abbildung 6.3 dargestellt ist, versagt der Schichtverbund an der Ober- und Unterseite bei unterschiedlichen Belastungen, was im Kraft-Weg-Diagramm im ersten Kraftabfall zu erkennen ist. Die maximal erreichbare Kraft wird an der Unterseite erreicht und liegt mit Ausnahme von Prüfkörper 3 im Bereich von 2,4 bis 2,75 kN. Dieser versagt bereits bei einer Kraft von 2,03 kN. Die Bruchbilder in Abbildung B.2 (c) zeigen an der unteren



Grenzfläche eine ähnliche Verformung des PLA wie die Zugscherprüfkörper, wohingegen an der oberen Grenzfläche keine Verformung erkennbar ist. Zudem ist dort eine leichte Unterextrusion im PLA sichtbar, die ggf. auf die Maschinenkalibrierung zurückzuführen ist. Aus der niedrigeren Extrusionstemperatur des PLA in Verbindung mit der höheren Erweichungstemperatur des ABS resultiert eine geringere Kettenmobilität im Vergleich zur Unterseite, was das temperaturbedingte Verknäulen der Polymerketten und somit die Ausprägung der Interdiffusionszone weniger stark begünstigt (Diffusion). In der unteren Grenzfläche wirkt sich zudem vermutlich die Verformung des PLA steigernd auf die Verbundhaftung aus, indem der Widerstand gegen die Scherkraft aufgrund der Geometrieänderung erhöht wird [Wat18].

Die Prüfung der Kombination aus einem starren (PLA) und einem flexiblen Material (TPU, NinjaFlex®) erfolgt in Anlehnung an DIN EN 1464 [DIN10], wobei die Geschwindigkeit im Versuch aufgrund der angepassten Prüfkörpergeometrie auf 50 mm/min reduziert wird (vgl. [Fre19]). Im Vergleich zu den Prüfkörpern (a) bis (c) weist der entwickelte Prüfkörper zur Ermittlung der Verbundhaftung unter Schälbelastung (d) mit 0,053 N/mm,  $\approx 2,9\%$  eine geringere Standardabweichung auf (siehe Abbildung 6.3). Der Versuchsaufbau und der Verlauf des Schälwiderstands über den Traversenweg sind in Abbildung 6.7 dargestellt. Die typischerweise bei Schälversuchen benötigte Anrisschälkraft ist bei allen Prüfkörpern deutlich zu erkennen, sodass die Bestimmung des resultierenden Schälwiderstands lediglich im Bereich einer annähernd gleichen Schälkraft erfolgt. Aufgrund der Kurvenverläufe wird der Bereich der Ermittlung des Schälwiderstands für die einzelnen Proben individuell festgelegt. Für Prüfkörper 2 wird der Bereich von 25 bis 75 mm der Ermittlung des Schälwiderstands zugrunde gelegt, wohingegen für die übrigen Prüfkörper der Bereich zwischen 25 und 100 mm angenommen wird. Somit ergibt sich für das Prüflös ein Schälwiderstand von 1,84 N/mm (vgl. Abbildung 6.3). Aus den geringen Standardabweichungen der Versuchsergebnisse kann eine Eignung der Prüfkörpergeometrie für die Charakterisierung von Verbundfestigkeiten von Kombinationen aus starren und flexiblen Materialien unter Schälbelastung geschlossen werden.



**Abbildung 6.7:** Aufbau und Schälwiderstand-Weg-Diagramm des Rollenschälversuchs

Generell weisen die Kurven des Schälwiderstands einen gleichmäßigen Verlauf auf, wobei der Anstieg des Schälwiderstands bei Prüfkörper 2 ab einem Traversenweg von etwa 75 mm aufgrund der Bruchbilder nicht zu erklären ist. Es wird vermutet, dass dies auf Schwankungen im Halbzeugdurchmesser des flexiblen Materials zurückzuführen ist, sodass im hinteren Bereich der Probe eine leichte Überextrusion und somit ein besserer Schichtverbund entsteht.

## 6.2 Identifikation von Einflussfaktoren auf die Schichtverbundgestaltung

Nachdem die Eignung der Prüfkörpergeometrien für die Ermittlung der Verbundhaftung in Abschnitt 6.1.2 aufgezeigt worden ist, kann in einem weiteren Schritt die Identifikation von Einflussfaktoren auf die Verbundfestigkeit von mittels MMM hergestellten Multi-Material-Bauweisen erfolgen. Hierzu wird in den Abschnitten 6.2.1 bis 6.2.3 eine theoretische Gegenüberstellung von material-, anlagen- und prozessspezifischen Einflussfaktoren sowie konstruktiven Möglichkeiten mit Adhäsionsmechanismen (siehe Abschnitt 2.2.2) durchgeführt. Aufgrund der großen Bedeutung der infolge materialabhängiger Schrumpfungen induzierten thermischen Spannungen auf die resultierende Verbundhaftung wird der Einfluss der einzelnen Faktoren hierauf ebenfalls untersucht [Fre19; Wat18]. Darüber hinaus werden in die Betrachtung Vor- und Nachbehandlungsmaßnahmen mit einbezogen. Diese bilden neben experimentellen Untersuchungen zur Steigerung der Verbundfestigkeit (Abschnitt 6.3) die Grundlage für die Ableitung von Konstruktionshinweisen und die Wissensbereitstellung in Bezug auf die Schichtverbundgestaltung (Abschnitt 6.4).

### 6.2.1 Material- und anlagenspezifische Einflussfaktoren

Tabelle 6.2 zeigt material- und anlagenspezifische Einflussfaktoren auf die Verbundhaftung, gegliedert nach den einzelnen Adhäsionstheorien und der Einbringung von thermischen Spannungen in den Schichtverbund. Die Beeinflussung ist jeweils gekennzeichnet (●). Die gemeinsame Verarbeitung von zwei unterschiedlichen Materialien in einem Bauprozess wird grundsätzlich durch das Verhältnis zwischen der Baukammer- bzw. Bauplattformtemperatur und der Erweichungstemperatur bestimmt. Eine gleichzeitige Verarbeitung ist nur dann möglich, wenn die Erweichungstemperatur des einen Materials oberhalb der für die Verarbeitung des anderen Materials benötigten Baukammer- bzw. Bauplattformtemperatur liegt. Im Vergleich zur Baukammertemperatur ist der Einfluss der Temperatur der Bauplattform lokal beschränkt und wirkt sich nur bis zu einer gewissen Bauteilhöhe aus. Eine weitere Grundvoraussetzung für die MMM bildet die Benetzbarkeit der Materialien, um eine initiale Haftung zu realisieren und somit das eine Material auf das andere aufzutragen zu können [Fre19; Wat18].

**Tabelle 6.2:** Material- und anlagenspezifische Einflussfaktoren auf die Verbundhaftung (basierend auf [Fre19])

<b>Einflussfaktor</b>	<b>Mechanische Adhäsion</b>	<b>Diffusions- theorie</b>	<b>Adsorptions- theorie</b>	<b>Polarisations- theorie</b>	<b>Thermische Spannungen</b>
<b>Material</b>					
Polarität			●	●	
Diffusionskoeffizient		●			
Molare Masse		●	●		
Wärmeausdehnung					●
Glasübergangstemperatur		●	●		●
Erweichungstemperatur		●	●		●
Benetzbarkeit	●		●		
Schmelztemperatur		●			●
Kristallinitätsgrad		●	●		●
Füllstoff	●	●	●	●	●
<b>Anlage</b>					
Bauraum-/ Bauplattformtemperatur		●	●		●
Maschinenkalibrierung	●	●			●



Die durch die Temperierung der Baukammer bzw. -plattform zusätzlich in das System eingebrachte Wärme kann aufgrund der Erhöhung der Oberflächentemperatur sowohl die Diffusion und die Adsorption als auch den Abbau thermisch induzierter Spannungen innerhalb des Schichtverbunds positiv beeinflussen [Fre19; Wat18]. Ein weiterer anlagenspezifischer Einflussparameter auf die Verbundhaftung stellt die Maschinenkalibrierung bzw. der Abstand zwischen Düse und Werkstück dar.

Materialseitig wird die Verbundhaftung primär durch die Diffusion bestimmt. Hierbei kommt der Differenz zwischen der Glasübergangs- bzw. Erweichungstemperatur (Kettenmobilität) des unteren Materials und der Extrusionstemperatur des zweiten, aufzutragenden Materials eine wesentliche Bedeutung zu. Eine hohe Temperaturdifferenz kann aufgrund der materialbedingten Schrumpfungen infolge der Abkühlung aber auch zu gesteigerten thermischen Spannungen innerhalb der Grenzschicht führen. Füllstoffe wie Glas- oder Kohlenstofffasern reduzieren die materialbedingte Schrumpfung und können sich so positiv auf die thermischen Spannungen innerhalb des Schichtverbunds zwischen den zu kombinierenden Materialien auswirken. Zudem kann eine durch den Füllstoff gesteigerte Wärmeleitfähigkeit des Materials die Interdiffusion begünstigen und auf diese Weise die Verbundhaftung steigern. Ein weiterer Faktor zur Entstehung von Wechselwirkungen innerhalb der Grenzschicht ist das Vorhandensein von funktionalen Gruppen (Polarität) [Fre19; Wat18]. Die Verbundfestigkeit wird weiterhin durch die materialspezifische Oberflächenrauheit bestimmt, die v.a. bei Belastungen parallel zur Grenzschicht zu einer Erhöhung der Verbundfestigkeit aufgrund mechanischer Adhäsion führen kann [Wat18].

### 6.2.2 Prozessspezifische Einflussfaktoren

Wie in Tabelle 2.2 dargelegt ist, haben die Prozessparameter bei der MEX einen wesentlichen Einfluss auf verschiedene Bauteileigenschaften. Neben der Beeinflussung von u.a. mechanisch-technologischen oder elektrischen Eigenschaften hat die Wahl der Prozessparameter auch Einfluss auf die Verbundhaftung in der Fertigung von MMB. Tabelle 6.3 zeigt die prozessparameterspezifischen Einflussfaktoren auf die Verbundhaftung.

**Tabelle 6.3:** Übersicht prozessspezifischer Einflussfaktoren auf die Verbundhaftung (basierend auf [Fre19])

<b>Einflussfaktor</b>	<b>Mechanische Adhäsion</b>	<b>Diffusionstheorie</b>	<b>Adsorptionstheorie</b>	<b>Polarisationstheorie</b>	<b>Thermische Spannungen</b>
<b>Prozessparameter</b>					
Extrusionstemperatur	•	•	•		•
Schichthöhe	•	•			•
Anzahl der Konturlinien	•				
Füllmusterorientierung (u.a. Linienlänge/-breite)	•				•
Füllgrad	•	•			•
Luftspalt	•				
Verfahrgeschwindigkeit		•	•		•
Flussrate	•	•			

Primär wechselwirken diese Einflussfaktoren mit der mechanischen Adhäsion und der Diffusion. Da die resultierende Schrumpfung neben dem Material von der Wahl der Prozessparameter wie dem Füllgrad oder der Füllmusterorientierung abhängt, werden hierdurch die im Schichtverbund entstehenden thermischen Spannungen beeinflusst (vgl. [Wan07]). Durch die Temperaturabhängigkeit der Viskosität des extrudierten Materials lassen sich zudem in Kombination mit der Wahl des Luftspalts zwischen zwei Materialsträngen oder der Oberflächenrauheit der darunterliegenden

Schicht formschlüssige Verbindungen realisieren [Fre19; Spo17; Wat18]. Eine Reduzierung der Verbundfestigkeit kann hingegen aus den prozessbedingten An- und Absatzpunkten – sofern diese in der Grenzfläche liegen – oder dem Treppenstufeneffekt aufgrund der Kerbwirkung resultieren [Wat18].

### 6.2.3 Konstruktive sowie vor- und nachbehandlungsspezifische Einflussfaktoren

Weitere Möglichkeiten zur Beeinflussung der Verbundhaftung bieten einerseits die AM-spezifischen Gestaltungsfreiheiten und andererseits Zusatzmaßnahmen wie eine Plasmavorbehandlung (Aktivierung) oder Tempern (siehe Tabelle 6.4). Wie bereits in Abschnitt 6.2.1 und 6.2.2 dargelegt ist, haben die Wahl der Reihenfolge der zu kombinierenden Materialien sowie die Lage (Baubene oder -richtung) und Geometrie des Schichtverbunds maßgeblichen Einfluss auf die resultierende Verbundfestigkeit. Diese Faktoren wirken sich neben der temperaturbedingten Interdiffusion, der Benetzung und den thermischen Spannungen auch auf die Oberflächenrauheit und somit die mechanische Adhäsion aus [Fre19; Wat18]. Aufgrund der erweiterten konstruktiven Freiheiten der additiven Fertigung gegenüber konventionellen Fertigungsverfahren bieten sich neue Möglichkeiten in der Gestaltung des Schichtverbunds im Hinblick auf mechanische Verankerungsstrukturen bzw. formschlüssige Verbindungen. Derartige Strukturen können sowohl regelmäßig als auch gradiert ausgeführt werden und bieten ein großes Potenzial in der Schichtverbundgestaltung.

**Tabelle 6.4:** Zusatzmaßnahmen und konstruktive Einflussfaktoren auf die Verbundhaftung (basierend auf [Fre19])

Einflussfaktor	Mechanische Adhäsion	Diffusions-theorie	Adsorptions-theorie	Polarisations-theorie	Thermische Spannungen
<b>Gestaltung/Konstruktion</b>					
Mechanische Verankerungsstrukturen (Formschluss)	•				
Topologie/Reihenfolge der kombinierten Materialien	•	•	•		•
<b>Vor-/Nachbehandlung</b>					
Plasmavorbehandlung	•	•	•	•	
Oberflächenglättung	•				
Tempern	•	•			•

Durch Maßnahmen wie eine Plasmavorbehandlung, eine Oberflächenglättung oder ein anschließendes Tempern kann die Verbundfestigkeit zusätzlich gesteigert werden. Die Wirksamkeit einer Plasmavorbehandlung ist im Bereich der Klebtechnik (u.a. [Noe04]) und des Mehrkomponentenspritzgießens (u.a. [Sch09]) bereits demonstriert worden. Durch den Einsatz von Plasma wird die Oberfläche des Festkörpers modifiziert, indem funktionale Gruppen in die Polymerketten eingebracht werden und somit die Polarität geändert wird. Durch diese Aktivierung wird eine deutliche Verbesserung der Verbundfestigkeit erzielt. Durch ein Tempern können hingegen einerseits thermische Spannungen innerhalb der Grenzschicht abgebaut und andererseits die Bildung der Interdiffusionszone positiv beeinflusst werden [Fre19]. Abschnitt 6.3 zeigt die Untersuchung von ausgewählten konstruktiven Möglichkeiten und von Vorbehandlungsmaßnahmen zur Steigerung der Verbundfestigkeit anhand von Experimenten, die deren Wirksamkeit analysieren.

## 6.3 Untersuchung ausgewählter Maßnahmen zur Schichtverbundgestaltung

In diesem Abschnitt werden unterschiedliche Gestaltungsmöglichkeiten und Vorbehandlungsmaßnahmen in Bezug auf die Beeinflussung der Verbundhaftung untersucht. Aufgrund der geringen

Standardabweichung wird für die Untersuchung ausgewählter Maßnahmen der Prüfkörpertyp (d) ausgewählt. Um anschließend die Gestaltungsmöglichkeiten im Hinblick auf formschlüssige Verbindungen näher zu analysieren, werden darüber hinaus in Abschnitt 6.3.2 detailliert gitterförmige Verankerungsstrukturen anhand von Zugscherversuchen experimentell untersucht.

### 6.3.1 Experimentelle Untersuchung von Maßnahmen zur Steigerung der Verbundhaftung

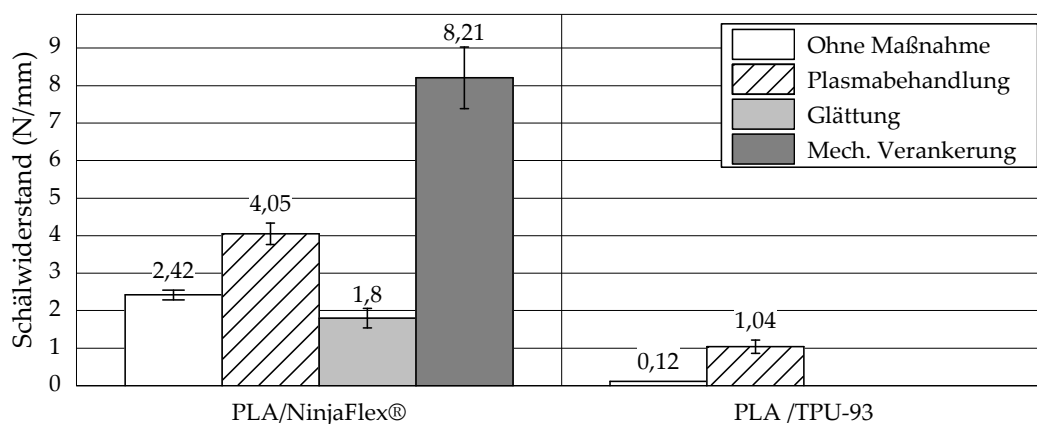
Auf Basis der in Abschnitt 6.2 identifizierten Einflussfaktoren auf die Verbundhaftung werden für die experimentellen Untersuchungen die Maßnahmen der Plasmavorbehandlung, der Oberflächen-glättung und des Formschlusses gewählt. Als starres Material wird PLA und als flexible Materialien werden zwei unterschiedliche TPU verwendet (siehe Tabelle 6.5).

**Tabelle 6.5:** Übersicht der verwendeten Materialien und genutzten Verfahrensparameter (basierend auf [Fre19])

Typ	Material	Farbe	Düsentemperatur	Verfahrgeschwindigkeit
<b>starr</b>	PLA [Nat19]	schwarz	215 °C	50 mm/s
<b>flexibel</b>	NinjaFlex® [Nin19]	weiß	230 °C	20 mm/s
	TPU-93 [vol19]	transparent	210 °C	20 mm/s

Konstant gehaltene Verfahrensparameter: Schichthöhe (0,2 mm), Linienbreite (0,4 mm), Füllmusterorientierung ( $\pm 45^\circ$ ), Konturlinienanzahl (2); Anlage (German RepRap X400); Probenanzahl (5)

In Abbildung 6.8 sind die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen der einzelnen Maßnahmen dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass das TPU-93 eine wesentlich geringere Verbundfestigkeit mit dem PLA aufweist als das NinjaFlex®, sodass ohne Zusatzmaßnahmen eine Verbundhaftung quasi nicht existent ist. Auch wenn die genauen molekularen Zusammensetzungen der beiden flexiblen Materialien nicht bekannt sind, konnte in einer Infrarotspektroskopie gezeigt werden, dass das NinjaFlex® auf Polyester und das TPU-93 auf Polyether basiert. Hieraus wird auf eine geringere Polarität des TPU-93 und daher schlechtere Bindungseigenschaften geschlossen [Fre19]. Generell weisen die einzelnen Prüflose geringe Standardabweichungen auf, welche auf eine Eignung der Maßnahmen zur Verbundfestigkeitssteigerung schließen lassen. Die Werte der Kombination von PLA/NinjaFlex® ohne verbundhaftungssteigernde Maßnahmen sind aufgrund eines Düsenwechsels und einer Neukalibrierung nicht direkt mit denen aus den Vorversuchen vergleichbar und zeigen daher eine Abweichung (siehe Abbildung 6.3 bzw. Abbildung 6.7).



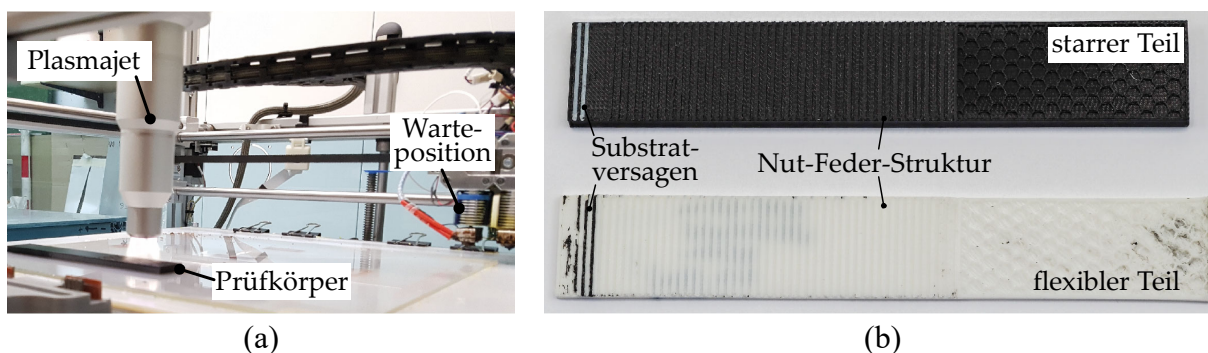
**Abbildung 6.8:** Gegenüberstellung der Schälwiderstände mit und ohne Maßnahme (basierend auf [Fre19])

Alle Maßnahmen werden ohne Unterbrechung des Fertigungsprozesses und somit ohne Entnahme der Probekörper durchgeführt. Generell bewirken eine Plasmavorbehandlung und die Einbringung

von Verankerungsstrukturen eine Steigerung der Verbundfestigkeit, wohingegen sich eine Oberflächenglättung geringfügig festigkeitsmindernd auswirkt. Aufgrund der geringen initialen Verbundfestigkeit von PLA/TPU-93 wird für diese Materialkombination lediglich die Maßnahme der Plasmavorbehandlung durchgeführt.

Für die Maßnahme der Oberflächenglättung wird die oberste Schicht des starren Fügeteils erneut mit aufgeheizter Düse (215 °C) abgefahren. Zur Vermeidung von Defekten aufgrund von Materialrückständen wird die Düse zuvor gereinigt und das Material über den Rückzug entfernt. Hierdurch wird die Oberflächenrauheit von  $R_c \approx 35 \mu\text{m}$  auf  $R_c \approx 26 \mu\text{m}$  reduziert (vgl. Abbildung B.3, Anhang B.2). Durch die Verringerung der Rauheit wird einerseits die Gesamtoberfläche der Probe reduziert und andererseits potenzielle Hinterschneidungen zur Erreichung einer mechanischen Verankerung entfernt, wodurch die Abnahme des Schälwiderstands zu erklären ist [Fre19].

Der Versuchsaufbau der Plasmavorbehandlung der starren Fügeteile ist in Abbildung 6.9 gezeigt. Während der Vorbehandlung pausiert der Fertigungsprozess und der Extruder verweilt in einer Warteposition, sodass der Plasmajet mittels Roboter von oben in die Fertigungsanlage geführt werden kann. Für die Maßnahme werden Atmosphärendruckplasma und ein Plasmajet der Plasmatrete GmbH eingesetzt, wobei der Probenabstand auf Basis von Vorversuchen auf 10 mm und die Geschwindigkeit auf 50 mm/s festgelegt werden. Nach der Plasmabehandlung der Probe fährt der Extruder in eine Station zur Reinigung und setzt anschließend die Fertigung mit dem Auftrag des flexiblen Materials fort. Der Schälwiderstand kann hierdurch bei der Kombination aus PLA/NinjaFlex® fast verdoppelt und bei der Kombination aus PLA/TPU-93 fast verzehnfacht werden. Auch wenn aufgrund der geringen initialen Verbundfestigkeit von PLA/TPU-93 die Verbundfestigkeit nach der Plasmabehandlung weiterhin deutlich unterhalb der der Kombination von PLA/NinjaFlex® liegt, werden durch die Steigerung der Verbundkraft die Gestaltungsmöglichkeiten im Hinblick auf formschlüssige Verbindungen bei der Kombination PLA/TPU-93 erweitert. Dies liegt darin begründet, dass die Gefahr eines Ablösens des TPU-93 während des Fertigungsprozesses infolge thermisch bedingter Schrumpfungen signifikant reduziert wird.



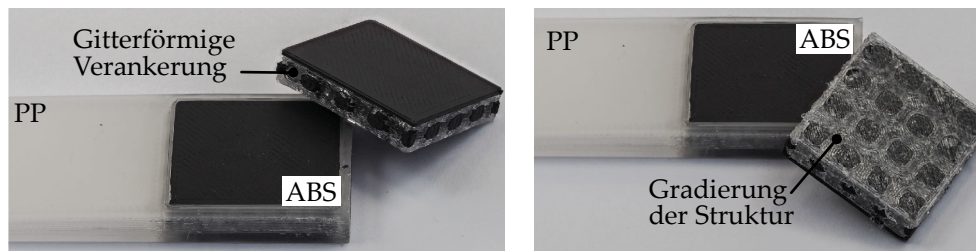
**Abbildung 6.9:** (a) Plasmavorbehandlung und (b) Nut-Feder-Struktur nach der Prüfung (basierend auf [Fre19])

Die größte Verbesserung des Schälwiderstands lässt sich durch die Einbringung von formschlüssigen Verbindungen in Kombination mit einer Oberflächenvergrößerung der Fügefläche erreichen. In diesem Fall wird eine Nut-Feder-Struktur genutzt, um eine mechanische Verankerung zwischen den beiden Materialien PLA und NinjaFlex® zu erzeugen (siehe Abbildung B.4, Anhang B.2). Die Integration von formschlüssigen Verbindungen ist jedoch nicht immer konstruktiv möglich. Im Vergleich zur Plasmavorbehandlung wird der Schälwiderstand durch die Verankerungsstrukturen verdoppelt und kann in Bezug auf das Prüflos ohne Zusatzmaßnahme mehr als verdreifacht werden. In dem in Abbildung 6.9 (b) dargestellten Bruchbild einer Probe mit Formschluss ist eine

Kombination aus adhäsivem und Substratversagen zu erkennen, wobei letzteres lediglich am Probenende auftritt. Die Maßnahme der Verankerungsstruktur zeigt das große Potenzial der Schichtverbundgestaltung, welches aus den konstruktiven Freiheiten der additiven Fertigung resultiert. Daher werden in Abschnitt 6.3.2 weitere Untersuchungen zu konstruktiven Möglichkeiten in Bezug auf gitterförmige, formschlüssige Verbindungen durchgeführt.

### 6.3.2 Experimentelle Untersuchungen zur konstruktiven Schichtverbundgestaltung

Nach Kumke et al. (2017) [Kum17a] lassen sich unterschiedliche Hebel der additiven Fertigung zur Gestaltung der formschlüssigen Verbindungen identifizieren. Diese umfassen Wandstärkenkombinationen, den Einsatz von Hinterschnitten und regelmäßige Gitterstrukturen. Hieraus lassen sich in Bezug auf die Schichtverbundgestaltung u.a. 3-D-Gitterstrukturen mit variablen Stabdurchmessern ableiten, welche zudem im Hinblick auf die Zellgeometrie und -anzahl variiert werden können. In Abbildung 6.10 ist exemplarisch eine mittels MMM hergestellte gitterförmige Verbindung mit Gradierung aus einem PP und einem ABS dargestellt. Hier wird das generelle Potenzial additiv gefertigter formschlüssiger Verbindungen demonstriert, da aufgrund der niedrigen Oberflächenenergie des PP eine Haftung ohne Zusatzmaßnahmen nicht möglich wäre.

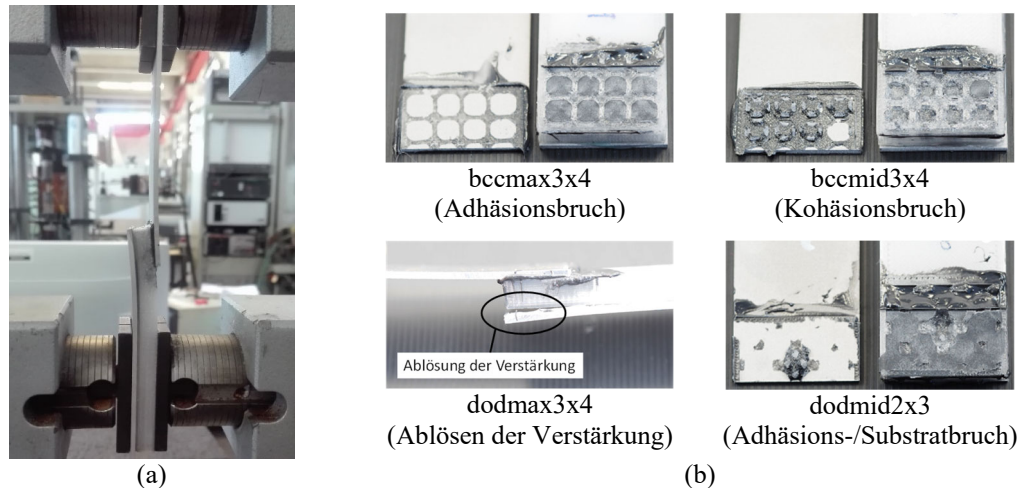


**Abbildung 6.10:** Darstellung einer dreidimensionalen und gradierten formschlüssigen Verbindung, bestehend aus einem PP-Grundkörper und einer flächigen ABS-Struktur (basierend auf [Fre19; Wat19b])

Zur Identifikation von Einflussfaktoren auf die Schichtverbundgestaltung mittels gitterförmiger Verbindungsstrukturen werden nachfolgend experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Um den Versuchsaufwand im Vergleich zu den Rollenschälversuchen zu reduzieren, erfolgen die Experimente anhand von Zugscherversuchen in Anlehnung an DIN EN 1465 [DIN09a]. Als zweites Material wird ein 2K-Polyurethanklebstoff (DELO®-PUR 9694 [DEL19]) eingesetzt, der in die additiv gefertigten Gitterstrukturen injiziert wird, sodass ein Formschluss zwischen Klebstoff und Gitterstruktur entsteht (vgl. [Wat19b]). Der Grundkörper ( $70 \times 25 \times 6 \text{ mm}^3$ ) wird aus PP [Ult19b] gefertigt und weist ohne Vorbehandlungs- oder Zusatzmaßnahmen keine Adhäsion mit dem Klebstoff auf. Als Fügepartner wird ein mittels Druckguss hergestelltes Aluminium (AlMg3) mit den Abmessungen von  $100 \times 25 \times 1,5 \text{ mm}^3$  eingesetzt, welches lediglich mittels Sandstrahlen vorbehandelt wird. Die Klebschichtdicke beträgt  $250 \text{ }\mu\text{m}$ . Zudem werden die additiv gefertigten PP-Prüfkörper mittels Aluminium verstärkt, um ein Aufbiegen der Proben während der Prüfung zu reduzieren und so das resultierende Biegemoment zu minimieren, welches aufgrund der Schwächung des Probenquerschnitts durch die integrierten Gitterstrukturen auftritt [Wat19b]. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 6.11 (a) gezeigt. Die dargestellten Bruchbilder in Abbildung 6.11 (b) zeigen das Eindringen des Klebstoffs in die Gitterstruktur. Die Einbringung der Gitterstrukturen ist auf den vorderen Bereich der Probe beschränkt.

Die PP-Proben werden mit einem Ultimaker 3 der Firma Ultimaker B.V. hergestellt, wobei beide Extruder für die Fertigung genutzt werden. Für die Herstellung des Grundkörpers wird eine Düse

mit 0,4 mm Durchmesser verwendet, die Gitterstrukturen werden zur besseren Darstellung der filigranen Geometrien hingegen mit einer Düse mit einem Durchmesser von 0,25 mm gefertigt. Die Schichthöhe wird für den Grundkörper auf 0,2 mm und für die Gitterstrukturen auf 0,1 mm festgesetzt. Die Konturlinienzahl variiert zwischen dem Grundkörper (drei) und dem Gitter (eine), wobei der Füllgrad jeweils 100% beträgt. Als Füllmusterorientierung wird ein Winkel von  $\pm 45^\circ$  gewählt [Wat19b]. Die Versuche werden mit einer Instron 5966 durchgeführt, wobei eine 10 kN-Kraftmessdose verwendet wird. Die Prüfungsgeschwindigkeit wird auf 2 mm/min festgelegt.



**Abbildung 6.11:** Darstellung des (a) Versuchsaufbaus und (b) ausgewählter Bruchbilder (basierend auf [Wat19b])

Die Gitterstrukturen werden mit Hilfe der Software Grasshopper und dem Plug-in Crystallon erzeugt. Als Variationsparameter werden die Zellgeometrie, die Zellanzahl und der Gradient des Stabdurchmessers festgelegt. Eine Übersicht der einzelnen Versuchsreihen ist in Tabelle 6.6 dargestellt. Der Gradient des Stabdurchmessers wurde so gewählt, dass dieser in Abhängigkeit von der Zellgeometrie und der Zellanzahl maximal oder in der Mitte zwischen Maximal- und Minimalwert in Bezug auf die minimal darstellbaren Featuregrößen liegt. Der Stabdurchmesser nimmt dabei in Baurichtung und entlang der wirkenden Scherkraft ab.

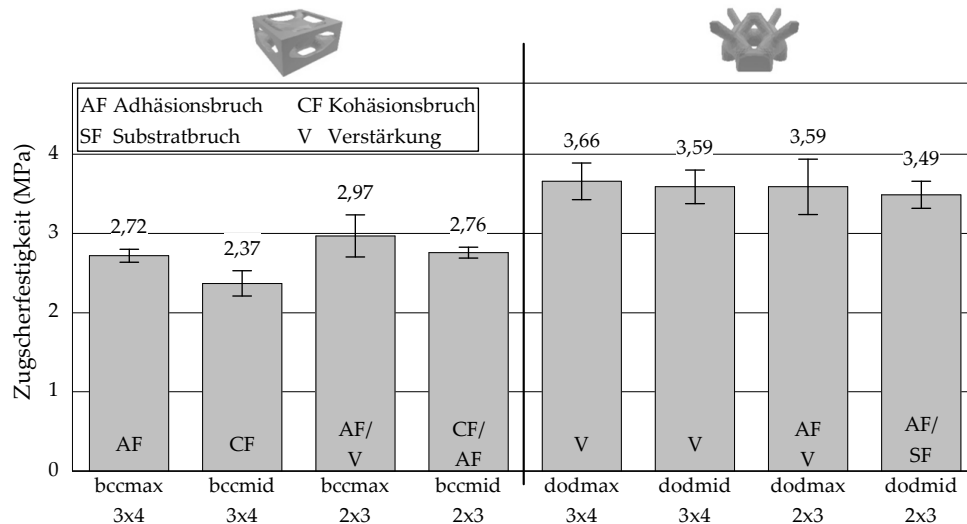
**Tabelle 6.6:** Versuchsaufbau zur Ermittlung der Einflüsse von Zellgeometrie, Zellanzahl und des Gradienten des Stabdurchmessers (basierend auf [Wat19b])

Bezeichnung	Zellgeometrie	Zellanzahl (Länge x Breite x Höhe)	Gradient des Stabdurchmessers [mm] (jeweils in Kraft- und Baurichtung)
bccmax3x4	kubisch-raumzentriert	3x4x1	1–2,3
bccmid2x3	kubisch-raumzentriert	3x4x1	1,4–2
bccmax2x3	kubisch-raumzentriert	2x3x1	1,4–2,6
bccmid3x4	kubisch-raumzentriert	2x3x1	1,7–2,3
dodmax3x4	(Rhomben-)Dodekaeder	3x4x1	1–1,85
dodmid3x4	(Rhomben-)Dodekaeder	3x4x1	1,3–1,6
dodmax2x3	(Rhomben-)Dodekaeder	2x3x1	1,4–2,4
dodmid2x3	(Rhomben-)Dodekaeder	2x3x1	1,7–2,1

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen sind in Abbildung 6.12 aufgeführt. Der Einfluss der Zellgeometrie auf die resultierende maximale Zugscherfestigkeit ist gut zu erkennen, auch wenn die Standardabweichungen bei den Rhombendodekaeder-Strukturen aufgrund der Ablösung der Verstärkung höher sind. Da bei den Prüflösen der Rhombendodekaeder-Strukturen die maximale Verbundfestigkeit zwischen PP-Grundkörper und der Verstärkung erreicht ist, können keine Aussagen in Bezug auf die Auswirkungen der Variationsparameter Zellanzahl und Gradient



des Stabdurchmessers getroffen werden. Die kubisch-raumzentrierten Gitterzellen zeigen hingegen eine Abhängigkeit der maximalen Zugscherfestigkeit von der Zellanzahl und der Gradierung. Letztere wirkt festigkeitssteigernd, wenn sowohl eine feste Anbindung an den Grundkörper als auch der Anteil des Klebstoffs innerhalb der Fügefläche infolge eines abnehmenden Stabdurchmessers möglichst groß ist. Diese Vermutung wird in Abbildung 6.11 (b) durch das Bruchbild von Prüflös bccmid3x4 (Kohäsionsbruch) unterstützt. Eine Reduzierung der Zellanzahl bewirkt ebenfalls eine Reduzierung des Anteils der Gitterstruktur in der Fügefläche, obwohl die Stabdurchmesser zunehmen. Dies führt trotz einer geringeren Anzahl von Hinterschnitten in Krafrichtung zu einer Steigerung der Zugscherfestigkeit (vgl. bccmid3x4 und bccmid2x3) [Wat19b].



**Abbildung 6.12:** Ergebnisse der Zugscherversuche gegliedert nach Zellgeometrie [Wat19b]

Aufgrund der Geometrie des Rhombendodekaeders ist der Anteil der Gitterstruktur innerhalb der Fügefläche im Vergleich zur kubisch-raumzentrierten Zelle deutlich geringer ausgeprägt, wodurch die allgemein höheren Zugscherfestigkeiten erklärt werden können. Eine gleichzeitige Reduzierung von Stabdurchmesser und -anzahl durch Verringerung der Zellanzahl (dodmid2x3) resultiert in einer Schwächung der Gitterstruktur, sodass diese teilweise versagt (vgl. Bruchbild) [Wat19b].

Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen zeigen einerseits die Potenziale der additiven Fertigung in Bezug auf die Schichtverbundgestaltung auf. Andererseits liefern sie Erkenntnisse in Bezug auf Einflussfaktoren in der Gestaltung gitterförmiger Verbindungsstrukturen, obwohl deren Übertragbarkeit auf die MMM nur bedingt möglich ist, da der verwendete Klebstoff andere mechanisch-technologische Eigenschaften besitzt. Folgende Gestaltungsempfehlungen können dennoch anhand der durchgeführten Experimente bezüglich der untersuchten Variationsparameter und Scherbelastungen abgeleitet werden [Wat19b]:

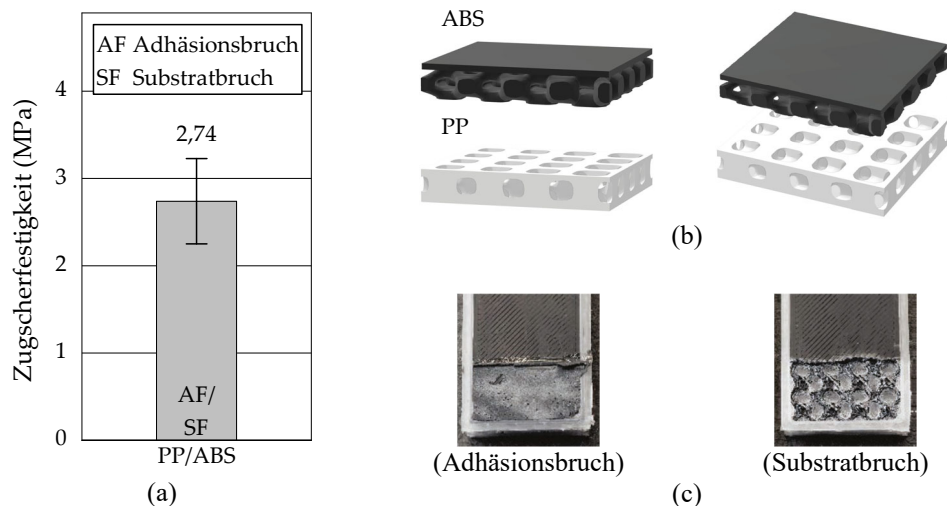
- **Zellgeometrie,** Festlegung der Anzahl der Hinterschnitte in Krafrichtung sowie des Anteils der Gitterstruktur innerhalb der Fügefläche. Die Wahl der Zellgeometrie hängt von den einzelnen Festigkeiten der zu kombinierenden Materialien ab. Da Überhangstrukturen durch das jeweils andere Material gestützt werden, resultieren diesbezüglich keine Limitierungen hinsichtlich der Wahl der Zellgeometrie, sofern eine ausreichende Benetzbarkeit gewährleistet ist.
- **Zellanzahl,** Beeinflussung der Hinterschnitte in Krafrichtung, des Stabdurchmessers und Gitterstrukturanteils in der Fügefläche. Die Festlegung der Zellanzahl erfordert einen Kompromiss aus einer möglichst hohen Anzahl von Hinterschnitten in Krafrichtung und ausreichend

großen Stabdurchmessern, um ein vorzeitiges Strukturversagen zu vermeiden. Restriktionen können bei einer hohen Zellanzahl und somit kleinen Einheitszellen in Bezug auf die Auflösungsgrenzen der Fertigungsanlage und in Abhängigkeit des verwendeten Materials entstehen.

- *Gradient des Stabdurchmessers*, Bestimmung des Gitterstrukturanteils in der Fügefläche und der Festigkeit der Anbindung an den Grundkörper. Durch die Wahl der Gradierung wird die Anbindung an den Grundkörper sichergestellt und der Anteil der Gitterstruktur innerhalb der Fügefläche in Abhängigkeit von der Materialfestigkeit maximiert bzw. minimiert. Die Auflösungsgrenzen der Anlage limitieren den minimalen Stabdurchmesser.

Zur Demonstration der Anwendbarkeit der Regeln auf die MMM wird ein PP-Grundkörper mit einer integrierten Fügefläche aus ABS gefertigt. ABS weist im Vergleich zum PP eine gute Fügbarkeit mittels Kleben auf und erfordert daher keine Zusatzmaßnahmen. Als Klebstoff wird der DELO®-PUR 9694 verwendet. Im Gegensatz zu der in Abbildung 6.10 dargestellten Probe wird die ABS-Fügefläche für die Versuche über die gesamte Probenlänge mit Ausnahme der Konturlinien (1,2 mm) im Randbereich eingebracht, da die Proben bei diesem Versuch nicht zusätzlich verstärkt werden. Als Zellgeometrie wird eine Einheitszelle ausgewählt, die auf der kubisch-raumzentrierten Zellgeometrie basiert, jedoch keine horizontalen und vertikalen Streben besitzt. Die Gitterstruktur ist nicht gradiert ausgeführt, da für die Verarbeitung beider Materialien jeweils ein Düsendurchmesser von 0,4 mm gewählt wird und somit die Auflösung im Hinblick auf kleine Stabdurchmesser limitiert ist. Der Stabdurchmesser der PP-Gitterstruktur beträgt 1,6 mm. Die ABS-Struktur bildet das Negativ, um die formschlüssige Verbindung zu realisieren (siehe Abbildung 6.13 (b)). Die Fügefläche aus ABS besitzt eine Höhe von 0,8 mm.

Das in Abbildung 6.13 (a) dargestellte Versuchsergebnis zeigt eine Zugscherfestigkeit von 2,74 MPa mit einer vergleichsweise hohen Standardabweichung von 0,49 MPa. Die Bruchbilder zeigen, dass die hohe Standardabweichung auf das Substratversagen innerhalb des aus ABS gefertigten Teils des Prüfkörpers zurückzuführen ist [Wat19b].



**Abbildung 6.13:** Darstellung des (a) Versuchsergebnisses der (b) Multi-Material-Probe mit integrierter Fügefläche aus ABS und PP-Grundkörper zur Demonstration der Anwendung eines gitterförmigen Formschlusses mit (c) ausgewählten Bruchbildern (basierend auf [Wat19b])

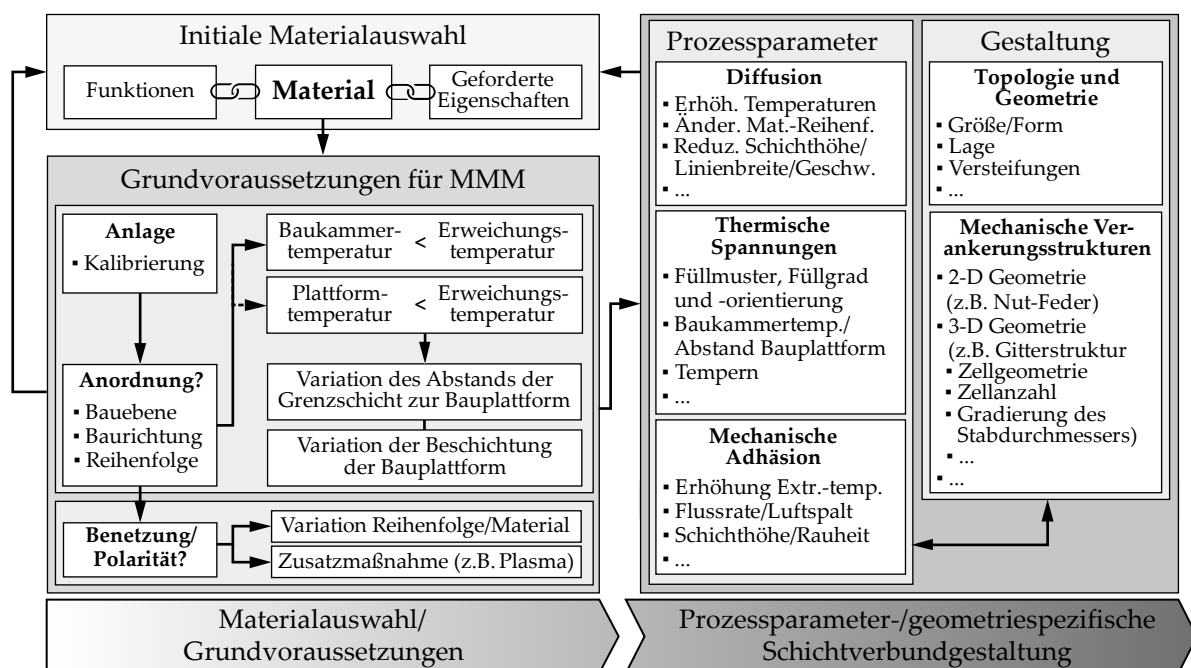
Generell lässt sich aus dem Versuchsergebnis eine Eignung formschlüssiger Verbindungen für die MMM schließen, die ein großes Potenzial im Hinblick auf die Schichtverbundgestaltung u.a. bezüglich Gradierung, Zellgeometrie und Zellanzahl aufweist. Aus der vergleichsweise hohen Stan-



dardabweichung kann zudem geschlossen werden, dass die Komplexität der Verbindung in Abhängigkeit zum Düsendurchmesser an technische Grenzen stößt, sodass diese zukünftig noch weiter erforscht werden müssen, um eine gezielte Auslegung des Formschlusses zu ermöglichen.

## 6.4 Entscheidungsunterstützung zur Schichtverbundgestaltung

Basierend auf den Ergebnissen aus den Abschnitten 6.2 und 6.3 können Empfehlungen bzw. Hinweise zur Schichtverbundgestaltung abgeleitet werden, die dem Produktentwickler bei der Konkretisierung von Lösungskonzepten und in Bezug auf die Beurteilung von deren technischer Umsetzbarkeit unterstützen. Die Konstruktionsempfehlungen werden hierarchisch in ein Vorgehen zur Entscheidungsunterstützung gegliedert, welches in Abbildung 6.14 gezeigt ist. Hierin sind die wichtigsten Erkenntnisse aus den theoretischen Überlegungen und den experimentellen Untersuchungen enthalten.



**Abbildung 6.14:** Entscheidungsunterstützung zur Schichtverbundgestaltung (siehe [Fre19])

Den Ausgangspunkt stellt eine initiale Materialauswahl dar, welche zunächst auf der Basis der zu realisierenden Funktionen und geforderten Eigenschaften in Bezug auf die Produkthanforderungen getroffen wird. Anschließend ist zu prüfen, ob die allgemeinen Voraussetzungen für eine gemeinsame Verarbeitung gegeben sind. Diese umfasst die Temperaturdifferenz zwischen den Erweichungstemperaturen und der für die Verarbeitung notwendigen Baukammer- bzw. der Bauplattformtemperatur. Wird lediglich eine beheizte Bauplattform verwendet, muss differenziert werden. Eine gemeinsame Verarbeitung der Materialien kann auch dann erfolgen, wenn die Plattformtemperatur oberhalb der Erweichungstemperatur liegt, sofern der Abstand des entsprechenden Materials zu dieser ausreichend groß ist. Zudem besteht die Möglichkeit, über eine Variation der Bauplattformbeschichtung eine Reduzierung der benötigten Temperatur zu realisieren und somit eine gemeinsame Verarbeitung zu ermöglichen. Dies kann jedoch in einer Erhöhung der thermischen Spannungen innerhalb des Schichtverbunds zwischen den zu kombinierenden Materialien resultieren. Die Lage des Schichtverbunds – ob in Bauebene oder -richtung angeordnet – wirkt sich

ebenfalls auf die Benetzbarkeit aus, da diese sowohl von der Oberflächenenergie des darunterliegenden Materials als auch von der Oberflächenrauheit, z.B. an Überhangstrukturen, abhängt. Sofern durch eine Variation der Materialreihenfolge keine Benetzung möglich ist, sind entweder eine Änderung der Materialauswahl oder der Zusatzmaßnahmen, wie eine Plasmavorbereitung, erforderlich, um eine initiale Haftung zwischen den zu kombinierenden Materialien zu ermöglichen.

Wenn eine generelle Haftung zwischen den zu kombinierenden Materialien vorhanden bzw. durch entsprechende Maßnahmen realisiert worden ist, kann mit Hilfe von prozessspezifischen Stellhebeln die Verbundfestigkeit gesteigert werden. Eine Erhöhung der Oberflächen- oder Düsentemperatur sowie eine Reduzierung der Schichthöhe, der Linienbreite oder der Verfahrgeschwindigkeit können zu einer Verbesserung der Verbundhaftung beitragen. Um eine möglichst starke Ausbildung der Interdiffusionszone zwischen den Materialien zu fördern, sollte die Reihenfolge bzw. Anordnung zudem so gewählt werden, dass die Differenz zwischen der Erweichungstemperatur des unteren Materials und der Extrusionstemperatur des oberen Materials maximal ist. Weiterhin sollten in diesem Zusammenhang die Wärmekapazität und -leitfähigkeit beachtet werden, da hierdurch zusätzlich die Temperatur innerhalb der Grenzschicht beim Auftragen des zweiten Material abhängt [Tam19]. Thermisch induzierte Spannungen innerhalb des Schichtverbunds können über die Wahl des Füllmusters bzw. der Füllmusterorientierung oder den Füllgrad beeinflusst werden. Weiterhin ist deren Abbau während des Prozesses durch die Temperierung der Baukammer oder den Wärmeeintrag der beheizten Bauplattform wie auch durch nachträgliches Tempern bedingt möglich. Eine Erhöhung der Extrusionstemperatur bewirkt eine höhere Fließfähigkeit des Materials und begünstigt auf diese Weise die mechanische Adhäsion, indem Zwischenräume der darunterliegenden Schicht besser ausgefüllt werden. In Kombination mit einer Reduzierung der Flussrate oder einer Erhöhung des Luftspalts zwischen den einzelnen Materialsträngen können gezielt Hohlräume in die Grenzschicht eingebracht werden, um mechanische Verankerungsstrukturen zu erzeugen und die Oberfläche im Hinblick auf die spezifische Adhäsion (u.a. Diffusion) zu erhöhen.

Neben der Lage und der Größe der Grenzschicht lassen sich durch die Freiheiten der additiven Fertigung in der Geometriegestaltung u.a. Versteifungen oder makroskopische Verankerungsstrukturen im Hinblick auf eine an den Belastungsfall angepasste Verbundfestigkeit realisieren. Die erweiterte Konstruktionsfreiheit erlaubt außerdem die Integration von zwei- oder dreidimensionalen formschlüssigen Verbindungen. Diese können in Abhängigkeit von der Belastungsart, der Festigkeit bzw. Steifigkeit der Materialien sowie deren Kompatibilität regelmäßig oder gradiert ausgeführt werden. Die Festlegung der Geometrie und der Größe der Verankerungsstrukturen wird durch die Auflösungsgrenzen der verwendeten Maschine und durch das genutzte Material limitiert.

## 6.5 Zusammenfassung

Durch eine Analyse bestehender Normen und Standards aus den Bereichen der Kunststofftechnik und Fügetechnologien wie Kunststoffschweißen und Kleben sind unterschiedliche Prüfkörpergeometrien zur Charakterisierung von Verbundfestigkeiten für die Multi-Material-Materialextrusion abgeleitet und experimentell validiert worden. Mit Hilfe dieser Prüfkörper und der theoretischen Betrachtung relevanter Adhäsionsmechanismen konnten Einflussfaktoren auf die Verbundhaftung ermittelt und Maßnahmen zur Schichtverbundgestaltung unter Berücksichtigung der konstruktiven Möglichkeiten der MEX identifiziert werden. Auf der Grundlage experimenteller Untersuchungen ist weiterhin die Möglichkeit formschlüssiger Verbindungen zur Steigerung der Verbundfestigkeit anhand von Zugscherversuchen untersucht worden. Hieraus konnte abschließend eine Entscheidungsunterstützung zur Schichtverbundgestaltung abgeleitet werden.

## **7 ERMITTLUNG AUSGEWÄHLTER KENNWERTE UND PROTOTYPISCHE UMSETZUNG DES WISSENSSYSTEMS**

In diesem Kapitel werden in Bezug auf die beiden in Abschnitt 5.3 beschriebenen Konstruktionsprinzipien für die MMM spezifische Kennwerte anhand von experimentellen Untersuchungen ermittelt. Auf diese Weise wird zudem deren Anwendbarkeit und technische Umsetzbarkeit geprüft. In Abschnitt 7.1 wird die lokale Integration von passiven Dämpfungsstrukturen und in Abschnitt 7.2 die Realisierung von wärmeabstrahlenden Strukturen untersucht. Das erarbeitete Wissen ergänzt die Konstruktionsprinzipien um quantitative Werte für ausgewählte Materialien und -eigenschaften sowie Materialkompatibilitäten. Hierdurch wird der Produktentwickler in der Entwicklung von Lösungskonzepten sowohl im Hinblick auf eine realistische Einschätzung der technischen Umsetzbarkeit in Bezug auf die jeweilige Problemstellung als auch in der Berücksichtigung von geometrie- und prozessseitigen Stellhebeln bzw. Konstruktionshinweisen unterstützt.

Aufbauend auf dem Vorgehen zur Generierung alternativer Lösungskonzepte – unterstützt durch Methoden und Hilfsmittel – in Abschnitt 5.4 wird das in Abschnitt 4.2 beschriebene Wissenssystem mit den in diesem Kapitel ermittelten Werten prototypisch in Form einer Graphendatenbank umgesetzt. Die Anwendung wird am Beispiel einer Neukonzeption einer additiv gefertigten Handprothese unter Berücksichtigung der Potenziale der MMM demonstriert.

### **7.1 Charakterisierung additiv gefertigter Akustischer Schwarzer Löcher**

In diesem Abschnitt wird die technische Umsetzbarkeit passiver Dämpfungsstrukturen unter Verwendung der Methode der Akustischen Schwarzen Löcher anhand von Balkenstrukturen mittels Multi-Material-Materialextusion untersucht. Chong et al. (2017) [Cho17] demonstrieren das Potenzial der MEX zur Herstellung von Balkenstrukturen mit integrierten Formfunktionen nach der Methode der ASL. Jedoch nutzen sie als Dämpfungsmaterial eine konventionelle Folie und somit nicht das Potenzial der MMM durch eine Kombination von starren und flexiblen Materialien. Das zugrundeliegende Funktionsprinzip der Dämpfungsmethode der ASL ist in den Abschnitten 5.1.3 bzw. 5.3 gezeigt. Zu deren technischen Realisierung ist neben einer lokalen Reduzierung der Steifigkeit der Bauteilstruktur die Applikation eines zweiten dämpfenden Materials erforderlich. Zur Identifikation von Einflussfaktoren auf die resultierende Dämpfung werden Voruntersuchungen in Bezug auf materialabhängige Verbundhaftungen sowie material- und prozessspezifische Biegesteifigkeiten anhand von quasistatischen Versuchen durchgeführt (Abschnitt 7.1.1). Aufgrund des Prinzips der ASL-Methode sind durch die Formfunktion die gestalterischen Freiheiten eingeschränkt, sodass in dieser Arbeit der Einfluss der Form des ASL nicht explizit untersucht wird. Die technische Umsetzbarkeit wird anhand von einfachen Balkenstrukturen untersucht. Die experimentellen Untersuchungen zur Bestimmung der Dämpfung sind in Abschnitt 7.1.2 beschrieben.

#### **7.1.1 Kennwertermittlung in Bezug auf die Verbundhaftung und Biegeeigenschaften**

Für die technische Umsetzbarkeit der Dämpfungsstrukturen werden zunächst Kennwerte in Bezug auf die Verbundhaftung zwischen potenziellen starren und flexiblen Materialien ermittelt. Die Kandidaten für die zu untersuchenden Materialien werden auf der Grundlage einer Analyse von Biegeeigenschaften der Halbzeuge für die jeweiligen Materialtypen ausgewählt (Tabelle 7.1). Anschließend wird die Verbundhaftung für unterschiedliche Kombinationen aus starren und flexiblen Materialien analysiert und jeweils der Biegemodul in Abhängigkeit des Rasterwinkels bestimmt.

### Ermittlung spezifischer Kennwerte in Bezug auf die Verbundhaftung

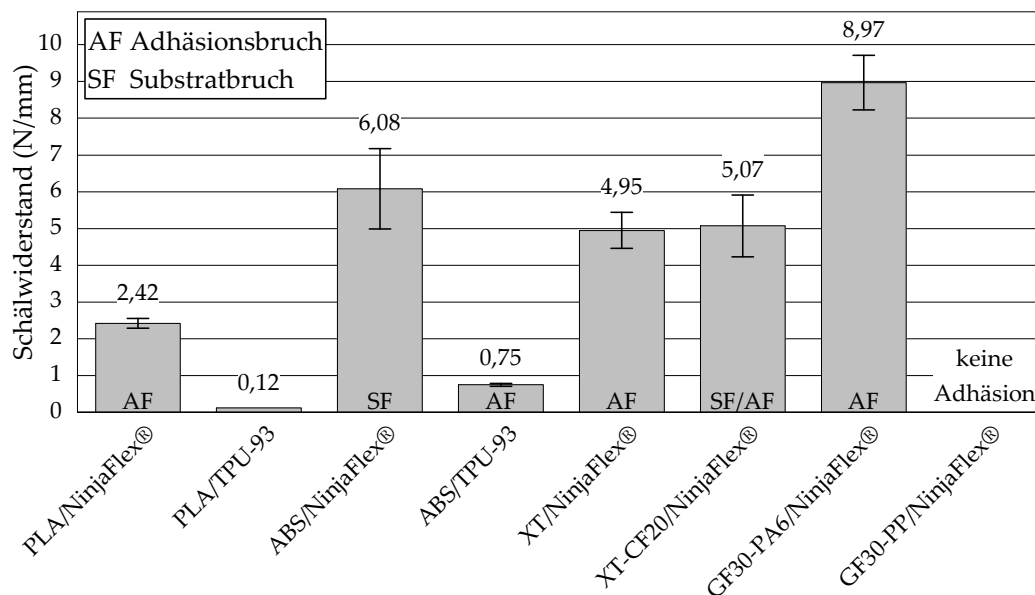
Aufgrund des Funktionsprinzips der ASL ist eine formschlüssige Verbindung infolge der Formfunktion nicht möglich, sodass eine ausreichend große Verbundhaftung zwischen den zu kombinierenden Materialien für deren technische Umsetzung gegeben sein muss. Basierend auf den experimentellen Untersuchungen aus Abschnitt 6.1.2 wird zur Ermittlung der Verbundhaftung der in Abbildung 6.2 dargestellte Prüfkörper zur Bestimmung des Schälwiderstands als kritischer Belastungsfall angewendet. In Tabelle 7.1 sind die zu untersuchenden Materialkombinationen mit den verwendeten Prozessparametersätzen aufgeführt. Als Anlage wird ein X400 der Firma German RepRap verwendet. Die Materialien werden vor der Verarbeitung jeweils individuell getrocknet. Pro Materialkombinationen werden fünf Proben gefertigt, wobei der Versuchsaufbau und die Prüfbedingungen denen in Abschnitt 6.1.2 entsprechen.

**Tabelle 7.1:** Übersicht über die geprüften Materialkombinationen mit Angabe der verwendeten Verfahrensparameter, gegliedert nach Materialien (basierend auf [Fre19])

Typ	Material	Farbe	Düsentemperatur	Materialkombinationen
starr	PLA [Nat19]	schwarz	215 °C	NinjaFlex®, TPU-93
	ABS [Inn19]	schwarz	245 °C	NinjaFlex®, TPU-93
	XT [Col19a]	schwarz	245 °C	NinjaFlex®
	XT-CF20 [Col19b]	schwarz	245 °C	NinjaFlex®
	GF30-PA6 [XST19a]	schwarz	270 °C	NinjaFlex®
	GF30-PP [XST19b]	schwarz	270 °C	NinjaFlex®
flexibel	NinjaFlex® [Nin19]	weiß	230 °C	PLA, ABS, XT, XT-CF20, GF30-PA6, GF30-PP
	TPU-93 [vol19]	transparent	210 °C	PLA, ABS

Konstant gehaltene Verfahrensparameter: Schichthöhe (0,2 mm), Linienbreite (0,4 mm), Füllmusterorientierung ( $\pm 45^\circ$ ), Konturlinien (2), Verfahrensgeschwindigkeit (starr: 50 mm/s, flexibel: 20 mm/s)

Abbildung 7.1 zeigt die Versuchsergebnisse der geprüften Materialkombinationen, wobei die Verbundhaftung für die Kombinationen PLA/NinjaFlex® und PLA/TPU-93 im Vergleich zur Untersuchung der Einflussfaktoren und Identifikation von Maßnahmen zur Steigerung der Verbundhaftung nicht erneut ermittelt worden sind (siehe Abbildung 6.8, Abschnitt 6.3.1).



**Abbildung 7.1:** Übersicht Schälwiderstände unterschiedlicher Materialkombinationen (basierend auf [Fre19])

Das TPU-93 ist lediglich in Kombination mit den starren Materialien PLA und ABS getestet worden, da die mechanisch-technologischen Eigenschaften der beiden untersuchten flexiblen Materialien ähnlich sind, die Verbundhaftungen des TPU-93 aber deutlich unterhalb der Kombination mit dem NinjaFlex® liegen. Zudem ist bei der Kombination GF30-PP/NinjaFlex® keine Benetzung gegeben, sodass eine gemeinsame Verarbeitung nicht möglich ist.

Die Kombination PLA/NinjaFlex® weist mit 2,42 N/mm den geringsten Schälwiderstand der mit NinjaFlex® getesteten Prüflose auf. Im Vergleich hierzu besitzen die Kombinationen mit XT bzw. XT-CF20 einen doppelt so hohen Schälwiderstand, die Kombination mit ABS einen zweieinhalb Mal so hohen Schälwiderstand und die Kombination mit GF30-PA6 einen etwa dreieinhalb Mal so hohen Schälwiderstand. Die Probenkörper aus NinjaFlex® und ABS bzw. XT-CF20 zeigen z.T. ein Herausreißen einzelner Stücke der Deckschichten, sodass hier ein Substratversagen des Grundkörpers bzw. ein Mischbruch vorliegt. Bei einer Probe der Kombination ABS/NinjaFlex® ist zudem das flexible Material gerissen, was auf eine lokale Unterextrusion und Schwächung des Schichtverbunds zurückzuführen ist. Der hohe Schälwiderstand der Kombination von glasfaserverstärktem PA6 und NinjaFlex® ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die hohe Polarität von ersterem zurückzuführen (vgl. [Fre19]). Weiterhin ist anhand der Versuchsergebnisse zu erkennen, dass der Füllstoff (Kohlestofffasern) bei XT keinen Einfluss auf die Verbundfestigkeit besitzt.

Nachfolgend werden die Biegeeigenschaften ausgewählter Materialien ermittelt. Für die Versuche werden als starre Materialien aufgrund der hohen Steifigkeit in Kombination mit der hohen Verbundhaftung GF30-PA6 und wegen der einfachen Verarbeitung gepaart mit einer moderaten Steifigkeit sowie Verbundhaftung PLA verwendet. Als flexibles Material wird NinjaFlex® bestimmt.

### Ermittlung spezifischer Kennwerte in Bezug auf die Biegeeigenschaften

Die Ermittlung des Biegemoduls erfolgt quasistatisch im 3-Punkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 178 [DIN17c]. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung C.1 (Anhang C.1) dargestellt. Die verwendeten Prozessparameter zur Herstellung der Probenkörper (80x10x4 mm<sup>3</sup>) sind in Tabelle 7.2 aufgeführt. Die Messspannlänge wird auf 64 mm und die Prüfgeschwindigkeit auf 2 mm/min festgelegt. Die Bestimmung des Biegemoduls erfolgt über den Traversenweg.

**Tabelle 7.2:** Verwendete Prozessparameter zur Bestimmung des statischen Biegemoduls

Typ	Material	Farbe	Temperatur		Rasterwinkel
			Düse	Plattform	
<b>starr</b>	PLA [Nat19]	schwarz	215 °C	60 °C	0°, ±45°
	GF30-PA6 [XST19a]	schwarz	270 °C	100 °C	0°, ±45°
<b>flexibel</b>	NinjaFlex® [Nin19]	weiß	230 °C	60/100 °C	±45°

Konstant gehaltene Verfahrensparameter: Schichthöhe (0,2 mm), Linienbreite (0,4 mm), Konturlinienanzahl (2), Verfahrensgeschwindigkeit (starr: 50 mm/s, flexibel: 20 mm/s)

Tabelle 7.3 zeigt die Versuchsergebnisse des quasistatischen Biegeversuchs. Die Differenz der Biegemoduln für PLA und GF30-PA6 für eine Füllmusterorientierung von ±45° ist, absolut betrachtet, gering, wohingegen unter Berücksichtigung der Dichte der spezifische Biegemodul des glasfaserverstärkten PA6 um etwa 15% höher ist. Für den Rasterwinkel von 0° ist die Steifigkeitsdifferenz zwischen den beiden Materialien deutlich stärker ausgeprägt (Faktor ca. 1,8). Dies entspricht den experimentellen Untersuchungen von Tekinalp et al. (2014) [Tek14], welche bei der Extrusion von faserverstärkten Materialien eine starke Orientierung entlang der extrudierten Stränge beobachten konnten. Der spezifische Biegemodul des PA6 ist mehr als zweimal so groß

wie der des PLA. Der Unterschied des spezifischen Biegemoduls zwischen dem flexiblen und den beiden starren Materialien ist deutlich zu erkennen und beträgt für den Rasterwinkel von  $\pm 45^\circ$  bzw.  $0^\circ$  für das PLA etwa Faktor 35 bzw. 38 und für das GF30-PA6 das ca. 40- bzw. 70-fache.

**Tabelle 7.3:** Nach DIN EN ISO 178 ermittelter Biegemodul

Typ	Material	Rasterwinkel [°]	Ermittelte Dichte [kg/m³]	Biegemodul [MPa]	Standardabweichung [MPa]	Spezifischer Biegemodul [MPa·m³/kg]
starr	PLA	0	1219,51	3440,41	39,97	2,82
	[Nat19]	$\pm 45$	1224,68	3196,75	68,98	2,61
	GF30-PA6	0	1087,67	5802,20	151,44	5,26
	[XST19a]	$\pm 45$	1097,93	3241,26	84,89	3,04
flexibel	NinjaFlex® [Nin19]	$\pm 45$	954,38	71,40	7,66	0,075

Aufbauend auf den Vorversuchen zu der Verbundhaftung und den Biegeeigenschaften werden nachfolgend experimentelle Untersuchungen zum Dämpfungseinfluss anhand einer einfachen Balkengeometrie durchgeführt. Verwendet werden die Materialkombinationen PLA/NinjaFlex® und GF30-PA6/NinjaFlex®.

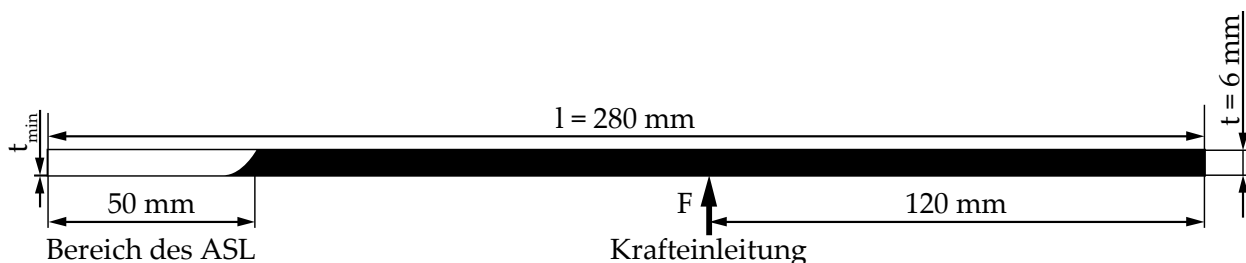
### 7.1.2 Experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung des Schwingungsverhaltens

In diesem Abschnitt wird die Dämpfung der additiv gefertigten ASL ermittelt. Hierzu wird zunächst der Versuchsaufbau erläutert, bevor die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen beschrieben und abschließend eine Integrationsmöglichkeit beispielhaft aufgezeigt werden.

#### Versuchsaufbau

Für die Fertigung der Balkenproben werden die in Tabelle 7.2 aufgeführten Prozessparameter genutzt. Die Balkenproben besitzen eine Gesamtlänge von 280 mm, eine Breite von 20 mm und eine Höhe von 6 mm (siehe Abbildung 7.2). Die Dämpfungsstruktur wird in dem weißen Bereich auf der linken Seite eingebracht (vgl. [Rot18]). Die Formfunktion des ASL wird über die von Mironov (1988) [Mir88] vorgestellte Gleichung (7.1) ermittelt. Die Formfunktion des ASL wird über die Höhen  $t_{min}$  (Minimum) und  $t_{max}$  (Maximum) beschrieben, wobei  $t_{min}$  für die experimentellen Untersuchungen auf 0,1 mm bzw. 0,6 mm festgelegt wird. Die Länge des ASL ( $l$ ) wird auf 50 mm und  $n$  auf 10 festgelegt.

$$t(x) = ax^n + b \quad \text{mit} \quad a = \frac{t_{max} - t_{min}}{l_{ASL}^n}, \quad b = t_{min}, \quad n \geq 2 \quad (7.1)$$



**Abbildung 7.2:** Abmessungen der Balkenprobe mit der ASL-Struktur auf der linken Seite (basierend auf [Rot18])

Die Anregung in der Versuchsdurchführung erfolgt durch einen elektrodynamischen Shaker. Für die Messung der Oberflächengeschwindigkeit wird ein Laser-Scanning-Vibrometer eingesetzt. Der Signaltyp wird in Abhängigkeit von der Frequenz variiert. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung C.2 (Anhang C.1) dargestellt. Zwischen dem Probenkörper und dem Shaker wird zudem ein

Kraftsensor angebracht. Die Oberflächengeschwindigkeit wird mit der anregenden Kraft normiert und über die Oberfläche gemittelt (mittlere Admittanz). Der betrachtete Frequenzbereich wird auf 3000 Hz begrenzt, da in diesem Bereich für alle Balkenkonfigurationen Dämpfungswerte ermittelt werden können.

**Tabelle 7.4:** Übersicht der zur Anregung der Balken genutzten Signaltypen

Frequenzbereich [Hz]	0–1000	1000–2000	2000–3000
Signaltyp	Pseudorandom	Sweep	Sweep

Für die experimentellen Untersuchungen werden insgesamt sieben unterschiedliche Balkenkonfigurationen gefertigt, welche in Tabelle 7.5 dargestellt sind. Mit Hilfe der Konfigurationen (a) bis (c) wird die Dämpfung des mittels MMM hergestellten Balkens im Vergleich zu einem ungedämpften Vollbalken und einem Balken mit ASL ermittelt. Mit Balken (d) wird der Einfluss der Steifigkeitsreduzierung innerhalb des ASL über die Variation von  $t_{min}$  untersucht. Die Balkenkonfigurationen (e) und (g) dienen der Untersuchung des Material- und Prozesseinflusses in Bezug auf die Biegesteifigkeit. Die Schichthöhe wird nicht variiert, da der Treppenstufeneffekt einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Dämpfung hat [Cho17]. Abbildung 7.3 zeigt exemplarisch die Balkenkonfigurationen (b) und (c).

**Tabelle 7.5:** Übersicht der untersuchten Balkenkonfigurationen

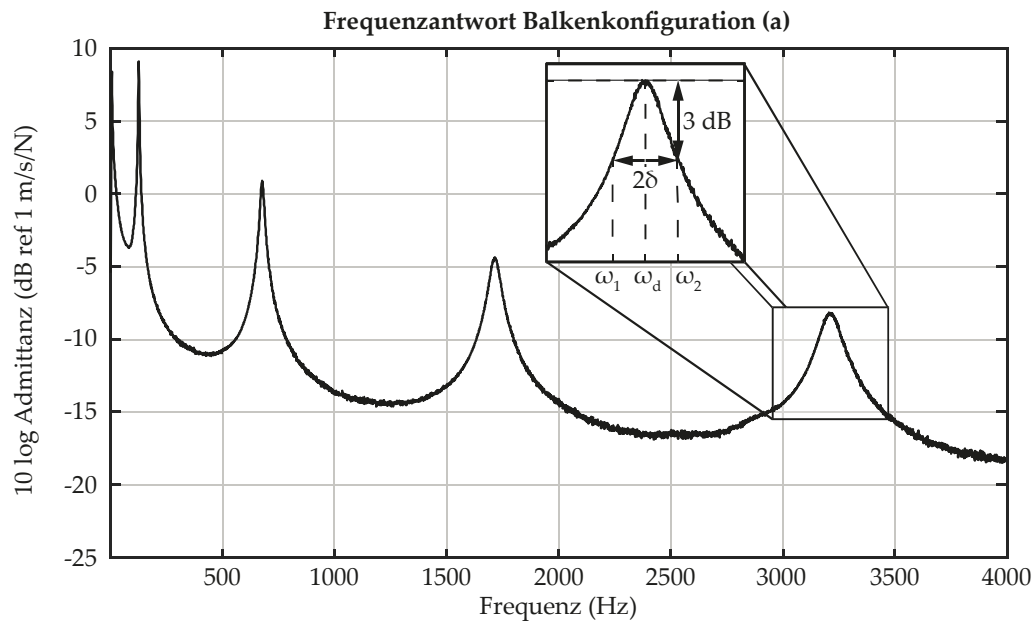
Dämpfung	Material-kombination	Gewicht	Rasterwinkel (starr/flexibel)	$t_{min}$
(a) Vollbalken	PLA	45,50 g	$\pm 45^\circ/-$	-
(b) ASL ungedämpft	PLA	36,90 g	$\pm 45^\circ/-$	0,6 mm
(c) ASL gedämpft	PLA/NinjaFlex®	41,80	$\pm 45^\circ/\pm 45^\circ$	0,6 mm
(d) ASL gedämpft	PLA/NinjaFlex®	41,20	$\pm 45^\circ/\pm 45^\circ$	0,1 mm
(e) ASL gedämpft	GF30-PA6/NinjaFlex®	38,50	$\pm 45^\circ/\pm 45^\circ$	0,6 mm
(f) ASL gedämpft	GF30-PA6/NinjaFlex®	38,00	$\pm 45^\circ/\pm 45^\circ$	0,1 mm
(g) ASL gedämpft	GF30-PA6/NinjaFlex®	36,50	$0^\circ/90^\circ$	0,1 mm



**Abbildung 7.3:** Exemplarische Darstellung der Balkenkonfiguration (b) ohne (vorne, Bezeichnung M\_09) und (c) mit Dämpfungsmaterial (hinten, Bezeichnung M\_11)

### Versuchsergebnisse zum Dämpfungsverhalten

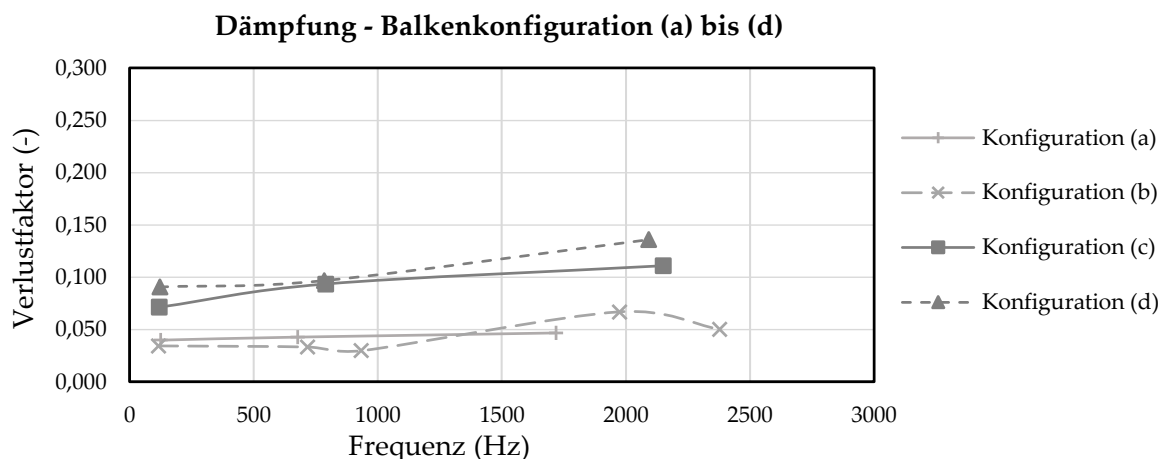
Zur Analyse des Dämpfungsverhaltens werden der Dämpfungsgrad ( $D$ ) bzw. der Verlustfaktor ( $d$ ) anhand der Systemantwort ermittelt. Die Bestimmung des Dämpfungsgrads erfolgt mit Hilfe des Peak-Amplitude Verfahrens (vgl. [Moe10]), welches aufgrund der schwachen Systemdämpfung anwendbar ist. Dieses Verfahren erlaubt eine frequenzabhängige Ermittlung des Dämpfungsverhaltens der einzelnen Balkenkonfigurationen an den Resonanzfrequenzen, sofern der Abfall dort mindestens 3 dB beträgt. Das Verfahren ist in Abbildung 7.4 am Beispiel der Frequenzantwort von Balkenkonfiguration (a) – dem ungedämpften Balken aus PLA – dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die einzelnen Resonanzen deutlich voneinander getrennt sind. Mit Hilfe von Gleichung (7.2) ist es möglich, an den einzelnen Resonanzen den Dämpfungsgrad ( $D_{(r)}$ ) zu ermitteln und auf diese Weise das frequenzabhängige Dämpfungsverhalten zu bestimmen.



**Abbildung 7.4:** Darstellung der Frequenzantwort des Vollbalkens (Konfiguration (a)) mit schematischer Darstellung des Peak-Amplitude Verfahrens zur Bestimmung des Dämpfungsgrads (siehe [Moe10])

$$D_{(r)} = \frac{\delta_{(r)}}{\omega_{d(r)}} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2 \omega_{d(r)}}, \text{ mit } D = \frac{d}{2} \quad (7.2)$$

Abbildung 7.5 zeigt den frequenzabhängigen Dämpfungsverlauf der Balkenkonfigurationen (a) bis (d), welche jeweils aus PLA gefertigt sind (vgl. Tabelle 7.5). Ein Vergleich der beiden unge-dämpften Konfigurationen (a) und (b) zeigt eine leicht geringere Dämpfung bzw. einen geringeren Verlustfaktor von Balkenkonfiguration (b) im niedrigen bis mittleren Frequenzbereich bis ca. 1300 Hz. Diese ist auf die geringere Masse durch den Ausschnitt des ASL zurückzuführen. Der Anstieg bei etwa 2000 Hz kann auf Basis der experimentellen Untersuchungen nicht erklärt werden und ist vermutlich auf Messunsicherheiten zurückzuführen. Die Applikation des Dämpfungsmaterials (NinjaFlex®) im Bereich des ASL mittels MMM – Konfiguration (c) und (d) – führt zu einem deutlichen Anstieg der Dämpfung um ca. Faktor 2.



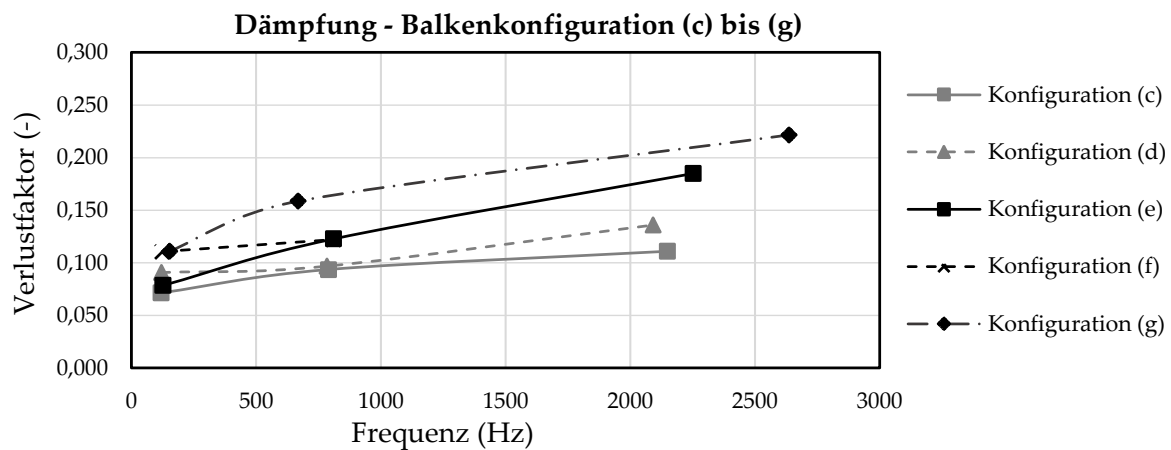
**Abbildung 7.5:** Darstellung des interpolierten Dämpfungsverlaufs; Konfiguration (a) bis (d)

Eine Reduzierung der minimalen Höhe des ASL-Segments ( $t_{min}$ ) wirkt sich im unteren ( $\approx 120$  Hz) und oberen Frequenzbereich ( $\approx 2100$  Hz) leicht dämpfend aus, wobei dieser Effekt im mittleren



Frequenzbereich bei etwa 790 Hz nicht auftritt. Der Effekt ist wahrscheinlich auf die stärkere Steifigkeitsreduzierung zurückzuführen. Die Tendenz ist ebenfalls im unteren Frequenzbereich bei den Proben aus GF30-PA6 – (e) und (f) – zu erkennen (Abbildung 7.6), wobei für die Balkenkonfiguration (f) im oberen Frequenzbereich keine Auswertung des Verlustfaktors möglich ist.

Vergleicht man die aus PLA gefertigten gedämpften Balken (c) und (d) mit den geometrisch gleichen Balkenkonfigurationen aus GF30-PA6 (e) und (f), ist der Verlustfaktor und somit die Dämpfung für die beiden letzteren Proben im mittleren und oberen Frequenzbereich um etwa 25 bis 30% höher (siehe Abbildung 7.6). Dieser Effekt ist durch die höhere spezifische Steifigkeit des glasfaserverstärkten Materials und den daraus resultierenden höheren Steifigkeitsunterschied bedingt. Eine Erhöhung der Balkendämpfung lässt sich durch die Wahl des Rasterwinkels infolge der Erhöhung des Steifigkeitsunterschieds zwischen dem starren und flexiblen Material weiter steigern (Balkenkonfiguration (g)). Durch eine Nutzung der material-, prozess- und geometriespezifischen Möglichkeiten der MMM wird gegenüber dem ungedämpften Balken (a) eine Erhöhung des Verlustfaktors um ca. Faktor 4 (g) erreicht (vgl. Abbildung 7.5).

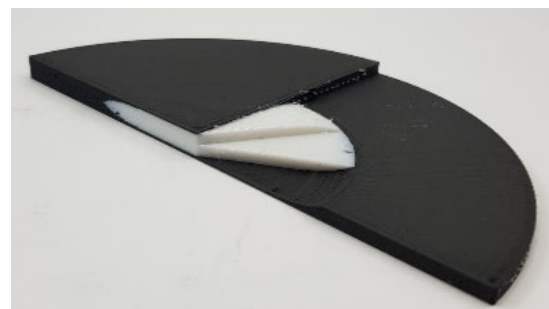


**Abbildung 7.6:** Darstellung des interpolierten Dämpfungsverlaufs; Konfiguration (c) bis (g)

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen ein hohes Potenzial im Hinblick auf die Integration passiver Dämpfungsmaßnahmen mittels MMM auf. Hierbei kann das Dämpfungsverhalten über die konstruktiven und prozessseitigen Stellhebel der additiven Fertigung sowie über die Materialauswahl eingestellt werden. Abbildung 7.7 zeigt unterschiedliche Integrationsmöglichkeiten von additiv gefertigten passiven Dämpfungsstrukturen auf. In (a) sind drei unterschiedliche Formfunktionen und Anordnungen dargestellt und (b) zeigt beispielhaft die Integration bzw. Einkapselung eines ASL in eine Plattenstruktur.



(a)



(b)

**Abbildung 7.7:** (a) Darstellung additiv gefertigter Balkenstrukturen mit integrierten ASL unterschiedlicher Formfunktionen [Rot17] und (b) Variante einer Integrationsmöglichkeit eines ASL in eine Plattenstruktur

Auf der Grundlage der Versuchsergebnisse wäre eine grobe Annäherung der Systemdämpfung über die Rayleigh-Dämpfung und somit eine Extrapolation möglich. Aufgrund des Umfangs der vorliegenden Messdaten sowie der verfahrensspezifischen und frequenzabhängigen Anisotropie der mechanisch-technologischen Bauteileigenschaften (siehe [Rot19]) und der daraus resultierenden Unsicherheiten wird in dieser Arbeit hierauf jedoch verzichtet.

## 7.2 Charakterisierung additiv gefertigter wärmeabstrahlender Strukturen

Neben der Integration elektrischer oder sensorischer Funktionen durch die lokale Verwendung elektrisch leitfähiger Materialien (siehe Abschnitt 5.2) ermöglicht die Nutzung des Effekts der Widerstandserwärmung in elektrischen Leitern (Joule-Effekt) auch die Realisierung wärmeemittierender Strukturen mittels MEX (u.a. [Dul18; Wat17a; Wat19a]). Die Kombination von elektrisch leitfähigen Materialien mit den konstruktiven Freiheiten der additiven Fertigung bietet neuartige Möglichkeiten in der Integration wärmeabstrahlender Strukturen. Neben einer variablen lokalen Integration von Heizstrukturen durch eine Multi-Material-Bauweise können z.B. flächige Strukturen mit variabler Wärmeemission durch eine gezielte Anpassung der Geometrie und der Prozessparameter realisiert oder gitterförmige Strukturen in Kanalstrukturen zur Erwärmung von Luftströmen integriert werden [Wat19a]. Zur Identifikation und Quantifizierung geometrie- und prozessspezifischer Einflussfaktoren auf den resultierenden elektrischen Widerstand werden experimentelle Untersuchungen an vier leitfähigen Materialien mit drei unterschiedlichen Füllstoffen durchgeführt (Abschnitt 7.2.1). Die Untersuchungen beschränken sich auf die Ermittlung des elektrischen Widerstands in Bauebene, sodass die Leitfähigkeit in Baurichtung – also eine Berücksichtigung der Bauteilorientierung – zunächst nicht betrachtet wird. Die Demonstration der technischen Umsetzbarkeit additiv gefertigter wärmeabstrahlender Strukturen wird in Abschnitt 7.2.2 anhand verschiedener Beispiele gezeigt. Das zugrundeliegende Konstruktionsprinzip ist in Abbildung 5.8 und Abbildung 5.9 dargestellt. Im Vergleich zur Integration der passiven Dämpfungsstrukturen mittels Methode der ASL ist die Materialkompatibilität zur Integration wärmeabstrahlender bzw. elektrisch leitender Strukturen nicht so kritisch, da formschlüssige Verbindungen zu deren Einkapselung genutzt werden können. Eine Kombination von PLA und ABS ist aufgrund der initialen Haftung und Benetzbarkeit möglich (Abschnitt 6.1.2). Zudem scheint der Füllstoff keinen Einfluss auf die Haftung zu haben (Abbildung 7.1).

### 7.2.1 Ermittlung prozessspezifischer Einflussfaktoren auf den elektrischen Widerstand

Zur Ermittlung verfahrensparameterspezifischer Einflüsse auf den elektrischen Widerstand und somit auch auf die Wärmeemission infolge der Widerstandserwärmung wird zunächst auf der Grundlage von Voruntersuchungen eine Materialauswahl mit unterschiedlichen Füllstoffen getroffen (siehe auch Tabelle 7.6): Proto-pasta Conductive PLA (PPC) [Pro19], 3dkonductive PLA (3dk) [3dk19], Functionalize F-Electric™ PLA (FFE) [Fun19] und MULTI3D Electrifi Conductive Filament (M3D) [Mul19]. Die verwendeten Probekörper und Messaufbauten sind in Abbildung C.3 bzw. Abbildung C.4 (Anhang C.2) dargestellt.

Da die Kontaktierung im Hinblick auf den aus der Kontaktierungsvariante resultierenden Widerstand maßgeblich die Ermittlung prozessabhängiger Faktoren auf den spezifischen Widerstand beeinflusst, muss dieser sowohl gering im Vergleich zum Probenwiderstand als auch reproduzierbar sein. Letzteres erfordert eine Unabhängigkeit vom Engewiderstand aufgrund der makro- und mikroskopischen Unebenheiten. Basierend auf Vorversuchen (vgl. [Wat19a]), ist in Bezug auf die

verwendeten Prüfkörpergeometrien und die Leitfähigkeit der Halbzeuge der untersuchten Materialien die Applikation einer Silberleitpaste (EMS 12640 [Ele19]) als geeignet identifiziert worden und wird daher zur Kontaktierung der Probekörper und Anwendungsbeispiele genutzt.

**Tabelle 7.6:** Übersicht der in den experimentellen Untersuchungen verwendeten Materialien mit Angabe der elektrischen Leitfähigkeit der Halbzeuge und der empfohlenen Verarbeitungsbedingungen

Material	Füllstoff/ Matrixmaterial	Temperatur (°C)		Spezifischer Widerstand <sup>1</sup> ( $\Omega\text{m}$ )	
		Bauplattform	Düse	Halbzeug	verarbeitet (Baubene/-richtung)
PPC	CB <sup>2</sup> /PLA	< 50	215–230	0,15	0,3/1,15
3dk	CB <sup>2</sup> /PLA	60–70	200–230	0,24	0,23/-
FFE	CNT <sup>3</sup> /PLA	< 70	215–230	$75 \cdot 10^{-4}$	-
M3D	CNW <sup>4</sup> /PCL	Raumtemperatur	130–160	$6 \cdot 10^{-5}$	-

<sup>1</sup> Information basiert auf Herstellerangaben; <sup>2</sup> Industrieruß, engl. carbon black (CB); <sup>3</sup> Kohlenstoffnanoröhren, engl. carbon nanotubes (CNT); <sup>4</sup> Kupfernanodrähte, engl. copper nanowires (CNW)

### Versuchsaufbau und Probenfertigung

Für die Fertigung der Probekörper zur Ermittlung des prozessparameterabhängigen spezifischen Widerstands (siehe Abbildung C.3 (a)) wird ein X400 der Firma German RepRap genutzt. Um einerseits eine Schädigung der Proben nach der Fertigung infolge der Ablösung von der Bauplattform zu verhindern und andererseits die Kontaktierung sowie Charakterisierung des Widerstands zu erleichtern, werden diese auf Objektträgern gefertigt. Zur Positionierung der Objektträger wird eine Form genutzt, welche mit Hilfe einer auf der Bauplattform angebrachten Magnetfolie fixiert wird. Hierdurch werden eine reproduzierbare Fertigung und eine konstante Messung sichergestellt (vgl. [Wat19a]). Die verwendeten Halbzeuge werden vor der Verarbeitung individuell getrocknet und während des Fertigungsprozesses in einer Box gelagert, welche die relative Luftfeuchtigkeit konstant hält (17–20%) und so die Wasseraufnahme während der Versuche minimiert.

Tabelle 7.7 zeigt die gewählten Prozessparametervariationen, welche auf Basis von Tabelle C.1 (Anhang C.2) festgelegt werden. Aufgrund der Tatsache, dass die Füllmusterorientierung einen signifikanten Einfluss auf den resultierenden elektrischen Widerstand additiv gefertigter Strukturen ausübt (vgl. [Wat17a]), deren Einfluss bisher aber kaum untersucht wurde, steht diese im Fokus der experimentellen Untersuchungen. Im Hinblick auf eine gezielte Einstellung des elektrischen Widerstands additiv gefertigter Strukturen werden weiterhin die Extrusionstemperatur, die Verfahrgeschwindigkeit und die Flussrate vollfaktoriell variiert. Pro Prozessparametersatz (351) werden drei Probekörper gefertigt, sodass hieraus ein Probenumfang von 1053 Stück resultiert.

**Tabelle 7.7:** Übersicht der prozessspezifischen Variationsparameter zur Charakterisierung des Einflusses auf die elektrische Leitfähigkeit (basierend auf [Wat19a])

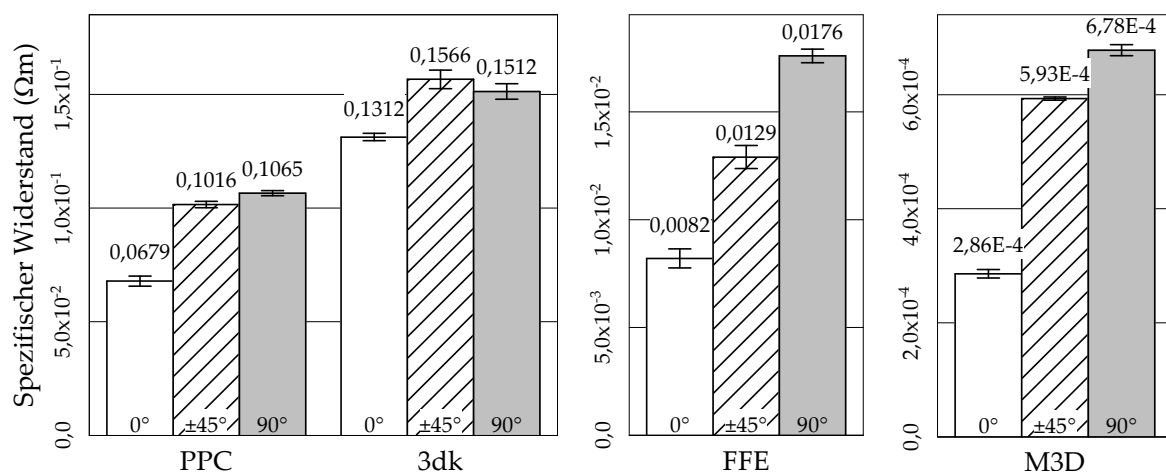
Material	Temperatur (°C)		Füllmuster- orientierung (°)	Geschwindigkeit (mm/s) ( $\Delta = 20$ )	Flussrate (%) ( $\Delta = 5$ )
	Bauplattform	Düse ( $\Delta = 10$ )			
PPC	60	210–240	0, $\pm 45$ , 90	20–60	95–105
3dk	60	210–240	0, $\pm 45$ , 90	20–60	95–105
FFE	60	220–240	0, $\pm 45$ , 90	20–60	95–105
M3D	Raum- temperatur <sup>1</sup>	170–180	0, $\pm 45$ , 90	20–60	95–105

<sup>1</sup> Vorbehandlung der Objektträger mittels Spray zur Verbesserung der Haftung

Die Fertigung der einzelnen Proben erfolgt sequentiell. Innerhalb eines Baujobs werden drei unterschiedliche Prozessparametersätze (jeweils drei Proben pro Objektträger) gefertigt, wobei lediglich die Geschwindigkeit zwischen den jeweiligen Prozessparametersätzen variiert wird. Hierdurch wird gewährleistet, dass keine Schwankungen bei der Extrusionstemperatur auftreten, da diese konstant bleibt. Der Bereich der Variation der Extrusionstemperatur wird auf Basis von Vorversuchen festgelegt. Die Raumtemperatur ( $23 \pm 1$  °C) und die relative Luftfeuchtigkeit (45–50%) werden während der Versuche konstant gehalten.

### Charakterisierung der Einflussfaktoren auf den spezifischen Widerstand

Die Charakterisierung des spezifischen Widerstands der zur Ermittlung von material- und prozessspezifischen Einflussfaktoren erfolgt mit Hilfe des in Abbildung C.4 (a) dargestellten Messaufbaus und unter Verwendung von Gleichung (C.1) (siehe Anhang C.2). Die Kontaktierung erfolgt mittels chemischer Kontaktierung mit der Silberleitpaste EMS 12640. In Abbildung 7.8 ist eine Übersicht des spezifischen Widerstands in Abhängigkeit von Material und Füllmusterorientierung dargestellt. Pro Kombination wird jeweils der Prozessparametersatz mit einer möglichst hohen Leitfähigkeit und einer geringen Standardabweichung ausgewählt (vgl. Tabelle C.2, Anhang C.2). Bei der Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass material- und füllmusterübergreifend in der Regel diejenigen Parametersätze einen niedrigen elektrischen Widerstand und geringe Standardabweichungen aufweisen, bei denen die Extrusionstemperatur maximal, die Flussrate möglichst hoch (Überextrusion) und die Geschwindigkeit gering sind, auch wenn bei letzterem das FFE eine Ausnahme bildet. Diese Prozessparametersätze werden anschließend zur Fertigung der wärmeabstrahlenden Strukturen unter Verwendung von Prüfkörpergeometrie (b) genutzt (Abbildung C.3).



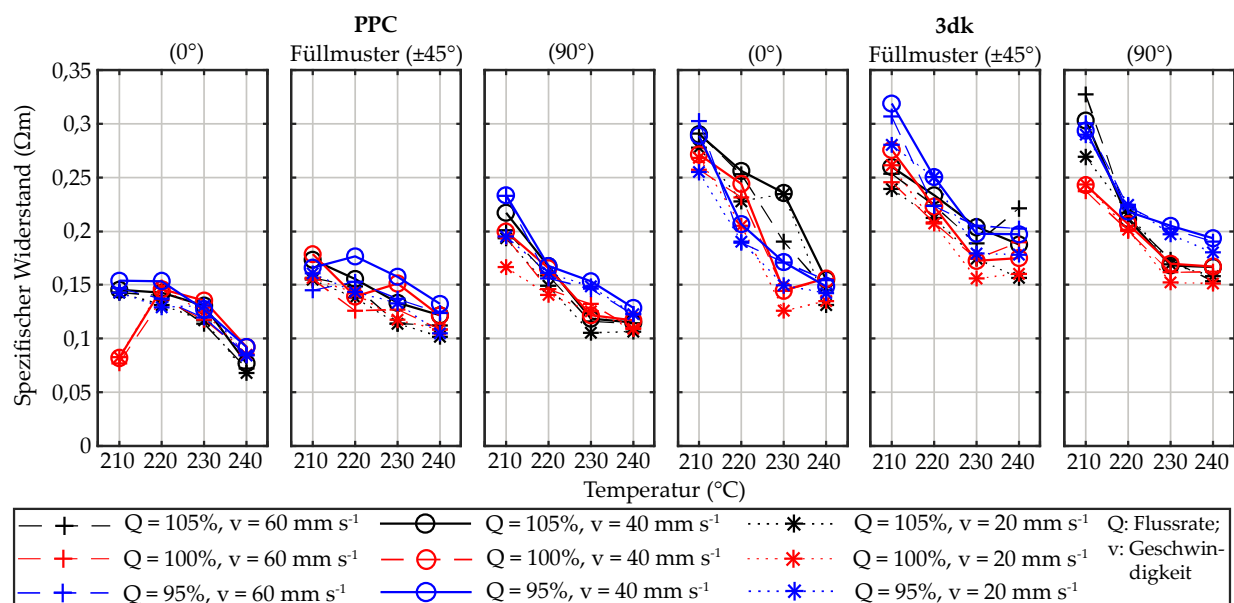
**Abbildung 7.8:** Übersicht der spezifischen Widerstände der untersuchten Materialien mit Darstellung des jeweils besten Prozessparametersatzes je Füllmusterorientierung (basierend auf [Wat19a])

Die Versuchsergebnisse zeigen sowohl eine Abhängigkeit von der Füllmusterorientierung als auch dem verwendeten Füllstoff. Letzterer hat den größten Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit, sodass bei einem Rasterwinkel von 0° zwischen dem CB-gefüllten Material (PPC) und dem CNT-gefüllten Material (FFE) in etwa Faktor 8 liegt. Das M3D weist im Vergleich zum FFE einen nochmal um etwa das 28-fache niedrigeren spezifischen Widerstand auf. Für PPC und 3dk werden die vom Hersteller angegebenen Werte zur Leitfähigkeit des verarbeiteten Materials unterschritten, wobei die Art der Kontaktierung nicht bekannt ist und diese maßgeblich den resultierenden Widerstand beeinflusst. Für FFE liegt der spezifische Widerstand für einen Rasterwinkel von 0° leicht höher ( $\approx 10\%$ ) als der des Halbzeugs, wohingegen für M3D der spezifische Widerstand der

Proben mit einer Füllmusterorientierung von  $0^\circ$  mit etwa Faktor 5 deutlich höher als der angegebene Halbzeugwiderstand liegt.

Der Einfluss der Füllmusterorientierung auf den elektrischen Widerstand ist einerseits auf die Stranggrenzen zurückzuführen, da deren Anzahl je nach Rasterwinkel variiert und der Widerstand zwischen den abgelegten extrudierten Strängen (Ausprägung der Interdiffusionszone [Sun08]) höher ist als entlang derselben [Ham17; Wat17a]. Andererseits zeigen Untersuchungen mit faserverstärkten Kompositmaterialien, dass während der Fertigung eine Orientierung der Fasern in Extrusionsrichtung erfolgt, woraus eine Verstärkung der Anisotropie in Bezug auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften wie Steifigkeit und Zugfestigkeit resultiert [Tek14]. Eine Ausrichtung des Füllstoffs könnte auch der Grund für die starke Anisotropie des elektrischen Widerstands bei FFE (CNT) und M3D (CNW) im Vergleich zu PPC und 3dk (jeweils CB) sein. Der geringe Einfluss des Rasterwinkels bei 3dk ist hingegen darauf zurückzuführen, dass bei der Verarbeitung innerhalb des Halbzeugs aufgrund der hohen Sprödhheit Defekte entstehen, welche sich auf die Güte des Strangverbunds auswirken und den resultierenden elektrischen Widerstand in Strangrichtung erhöhen (vgl. [Wat19a]).

Neben der Füllmusterorientierung wird der resultierende elektrische Widerstand bei der additiven Fertigung u.a. auch durch die Extrusionstemperatur, die Verfahrensgeschwindigkeit und die Flussrate bestimmt. Für die beiden mit Industrieroß gefüllten Materialien sind die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung in Bezug auf diese Prozessparameter in Abbildung 7.9 aufgeführt.

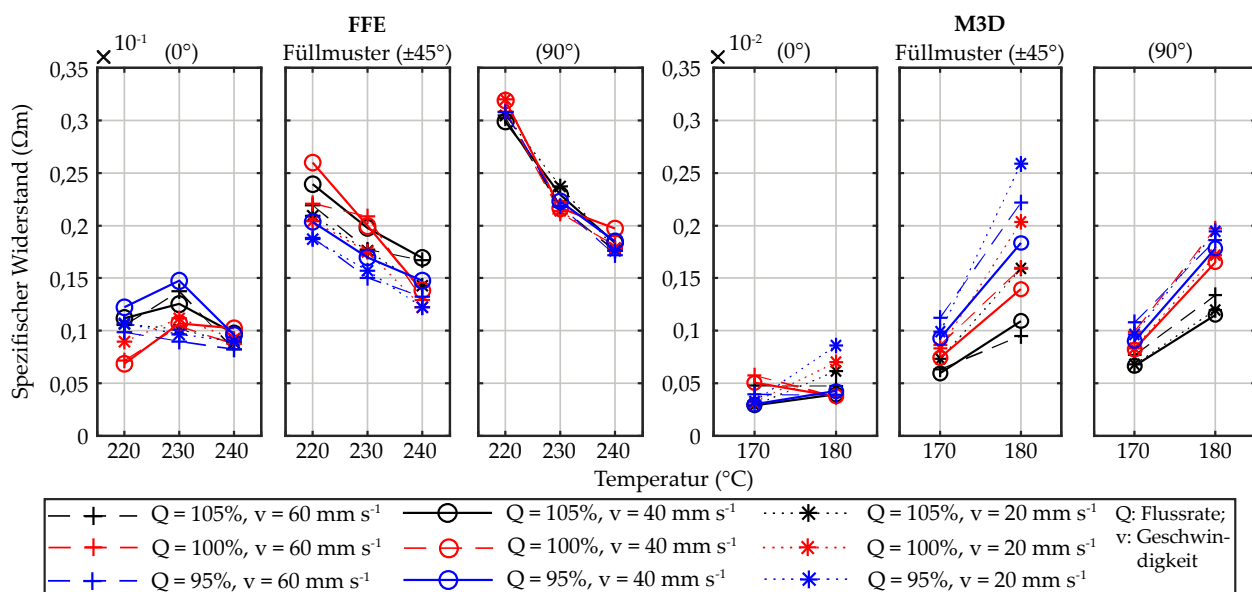


**Abbildung 7.9:** Übersicht des spezifischen Widerstands (PPC/3dk) in Abhängigkeit von der Füllmusterorientierung, der Extrusionstemperatur, der Flussrate und der Geschwindigkeit (basierend auf [Wat19a])

Primär wirkt sich eine erhöhte Extrusionstemperatur positiv auf den spezifischen Widerstand aus und bewirkt seine deutliche Reduzierung. Der Temperatureinfluss stagniert jedoch – abgesehen von PPC und einem Rasterwinkel von  $0^\circ$  – beim Erreichen einer bestimmten Temperatur. Hieraus kann geschlossen werden, dass die maximale Ausprägung der Interdiffusionszone zwischen den Einzelsträngen erreicht ist. Weiterhin ist aus den Diagrammen ersichtlich, dass durch eine Erhöhung der Extrusionstemperatur der Einfluss der Füllmusterorientierung signifikant abnimmt. Der Einfluss der Flussrate ist lediglich bei den Rasterwinkeln von  $\pm 45^\circ$  und  $90^\circ$  erkennbar. Der Einfluss der Verfahrensgeschwindigkeit ist im Vergleich zur Temperatur und dem Rasterwinkel ebenfalls

deutlich geringer, wobei sich geringere Geschwindigkeiten in der Regel infolge des größeren Energieeintrags widerstandsreduzierend auswirken. Die geringen Unterschiede zwischen den Geschwindigkeiten von 40 und 60 mm/s bei den Füllmusterorientierungen  $\pm 45^\circ$  und  $90^\circ$  sind vermutlich durch die geringe Probenbreite bedingt, sodass aufgrund der Umkehrpunkte und der begrenzten Beschleunigung der Fertigungsanlage die maximale Geschwindigkeit nicht erreicht wird. Die Ausreißer bei PPC (Rasterwinkel  $0^\circ$ , Flussrate 100%, Extrusionstemperatur  $210^\circ\text{C}$ ) können nicht erklärt werden [Wat19a], da die Proben keine äußeren Defekte aufweisen.

Abbildung 7.10 zeigt die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen für FFE und M3D. Im Vergleich zu PPC und 3dk ist der Einfluss des Rasterwinkels bei FFE deutlich stärker ausgeprägt, was vermutlich auf eine Orientierung der CNT während der Verarbeitung zurückzuführen ist. Diese Vermutung wird durch den kaum existenten Einfluss der Temperatur bei einem Rasterwinkel von  $0^\circ$  bestätigt. Aufgrund der Stranggrenzen bei einer Füllmusterorientierung von  $\pm 45^\circ$  und  $90^\circ$  wirkt sich bei FFE eine Temperaturerhöhung stark widerstandsreduzierend aus. Der geringe Widerstand bei einem Rasterwinkel von  $0^\circ$ , einer Flussrate von 100% und einer Extrusionstemperatur von  $220^\circ\text{C}$  könnte darin begründet liegen, dass aufgrund der höheren Viskosität des Materials die übertragbaren Scherkräfte zur Orientierung der CNT höher sind. Es gilt anzumerken, dass dieser Effekt bei einer Über- (Flussrate 105%) und einer Unterextrusion (Flussrate 95%) weniger stark auftritt, da hier vermutlich Defekte innerhalb des Strangverbunds widerstandssteigernd wirken [Wat19a]. Bei einem Rasterwinkel von  $\pm 45^\circ$  ist ein Einfluss von Verfahrensgeschwindigkeit und Flussrate sichtbar, wobei deren Reduzierung jeweils zu einer Erhöhung der Leitfähigkeit führt.



**Abbildung 7.10:** Übersicht des spezifischen Widerstands (FFE/M3D) in Abhängigkeit von der Füllmusterorientierung, der Extrusionstemperatur, der Flussrate und der Geschwindigkeit (basierend auf [Wat19a])

Bei M3D ist ebenfalls die Abhängigkeit des spezifischen Widerstands von der Füllmusterorientierung zu erkennen. Im Gegensatz zu den anderen untersuchten Materialien resultiert hier eine Temperaturerhöhung in einer signifikant niedrigeren elektrischen Leitfähigkeit [Wat19a]. Dieser Effekt ist durch eine Oxidation der CNWs bei Temperatureinwirkung bedingt und ist daher aufgrund der niedrigeren Geschwindigkeit an den Umkehrpunkten und des damit verbundenen höheren Temperatureintrags bei einem Rasterwinkel von  $\pm 45^\circ$  und  $90^\circ$  stärker ausgeprägt. Eine Reduzierung der Flussrate wirkt sich ebenfalls negativ auf die Leitfähigkeit aus. Generell resultieren eine niedrige Extrusionstemperatur in Verbindung mit einer höheren Verfahrensgeschwindigkeit und einer

geringen Anzahl an Stranggrenzen und Umkehrpunkten (z.B. Rasterwinkel  $0^\circ$ ) in einer schwachen thermischen Schädigung. Aufgrund der geringen Fließfähigkeit des Materials infolge des Füllstoffs kann es zu Defekten innerhalb der Proben kommen, die wiederum zu einer Erhöhung des Widerstands und einer Reduzierung der Stromdichte führen (vgl. [Wat19a]).

Insgesamt kann aus den experimentellen Untersuchungen gefolgert werden, dass der resultierende elektrische Widerstand additiv gefertigter Strukturen neben der Leitfähigkeit des Ausgangsmaterials maßgeblich durch die verwendeten Prozessparameter beeinflusst werden kann. Hierdurch wird eine gezielte Einstellung der elektrischen Leitfähigkeit – zusätzlich zur Geometrie – u.a. auch über die Wahl der Füllmusterorientierung oder der Extrusionstemperatur möglich, um diese an die geforderten Eigenschaften anzupassen.

### Charakterisierung der Einflussfaktoren auf die Wärmeemission

Die Auswirkungen der Widerstandsänderung auf die elektrische Leistung und die Wärmeemission werden innerhalb dieses Abschnitts für die Materialien PPC, FFE und M3D beschrieben. 3dk wird nicht weiter betrachtet, da das Material auf der gleichen Kombination von Matrixpolymer und Füllstoff basiert wie PPC, im Vergleich aber einen höheren elektrischen Widerstand aufweist. Für die Fertigung der Probekörper werden die in Abbildung C.3 (b) dargestellte Geometrie und die in Tabelle C.2 aufgeführten Prozessparametersätze verwendet (siehe Anhang C.2). Die Fertigung und Messung der Proben erfolgt ebenfalls auf Objektträgern. Da die Standardabweichungen in den vorherigen Versuchen vergleichsweise gering sind, werden pro Prozessparametersatz lediglich zwei Probekörper gefertigt. Ein Probekörper dient jeweils zur Aufnahme der Wärmeverteilung und der andere zur Ermittlung der Strom-Spannungs-Kennlinie.

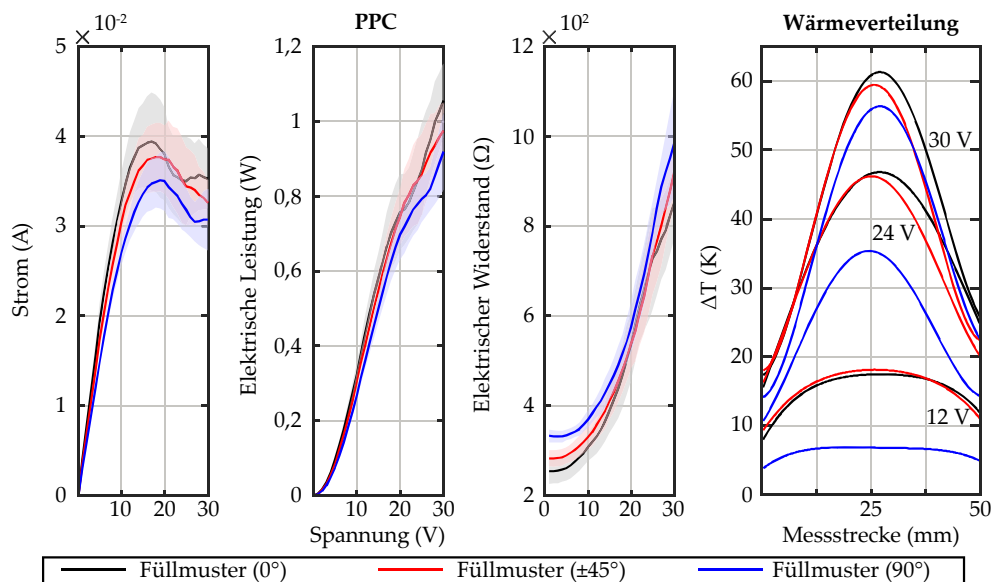
Die erste Probe wird zur Ermittlung spannungsabhängiger Wärmeverteilung verwendet. Die Aufnahme der Wärmebilder erfolgt mit einer Thermographiekamera (VarioCAM® HD head 800, InfraTec GmbH), wobei die Erhöhung der Oberflächentemperatur ( $\Delta T$ ) entlang einer Linie von 50 mm zwischen der Kontaktierung gemessen wird. Alle experimentellen Untersuchungen werden bei einer Umgebungstemperatur von  $21 \pm 1^\circ \text{C}$  durchgeführt. Es wird der in Abbildung C.4 (b) (Anhang C.2) dargestellte Messaufbau verwendet, wobei die Errechnung des durch die Probe fließenden Stroms und des Probenwiderstands mit Hilfe von Gleichung (C.2) bzw. (C.3) erfolgt.

Die Strom-Spannungs-Kennlinien werden mit demselben Prüfkörper dreimal aufgenommen, um hierdurch die Reproduzierbarkeit der Leistungscharakteristik zu untersuchen. Vor der ersten Messung wird bei allen Probekörpern die ermittelte Maximalspannung für 15 Minuten angelegt, um Messfehler aufgrund von Widerstandsänderungen, z.B. infolge eines Temperns oder einer Verformung durch das Aufheizen und anschließende Abkühlen, zu reduzieren. Die maximal angelegte Spannung hängt sowohl vom Material als auch der Füllmusterorientierung ab. Sie wird auf der Grundlage der Untersuchungen zur Wärmeverteilung abhängig von der Temperaturentwicklung ermittelt. Die Maximalspannungen werden für die einzelnen Proben wie folgt festgelegt: PPC 30 V ( $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $90^\circ$ ), FFE 12 V ( $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ) und 20 V ( $90^\circ$ ), M3D 6 V ( $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $90^\circ$ ).

Abbildung 7.11 zeigt den Verlauf des Stroms, der Leistung und des elektrischen Widerstands über die angelegte Spannung und in Abhängigkeit von der Füllmusterorientierung und der aus den drei Messreihen resultierenden Standardabweichung. Außerdem sind die mittels eines zweiten Prüfkörpers auf Basis des gleichen Prozessparametersatzes aufgenommenen Aufheizkurven – ebenfalls gegliedert nach der Füllmusterorientierung – dargestellt. Der Strom erreicht bei PPC, abhängig von der Füllmusterorientierung, aufgrund der unterschiedlichen Widerstände, das Maximum



zwischen 15 und 20 V. Zwischen 5 und 18 V verläuft der Anstieg der Leistung annähernd linear, wobei bei höheren Spannungen aufgrund des exponentiellen Anstiegs des elektrischen Widerstands der Strom abfällt. Die deutliche Erhöhung des Probenwiderstands resultiert aus einem Anstieg der Probenkörpertemperatur infolge der Widerstandserwärmung, bedingt durch dessen Temperaturabhängigkeit (vgl. [Kwo17; Lei12; Wat19a]). Im Vergleich zu den beiden anderen Materialien (siehe Abbildung 7.12 und Abbildung 7.13) ist die Abweichung des Widerstands zwischen den Messreihen vergleichsweise hoch, was in einer Verformung (piezoresistiver Effekt des PPC, siehe [Lei12]) und/oder Tempern der Proben beim Überschreiten der Erweichungstemperatur des Matrixpolymers begründet sein könnte. Der Effekt ist bei einem Rasterwinkel von  $90^\circ$  geringer ausgeprägt, wobei die Erweichungstemperatur des Matrixpolymers ( $\approx 60^\circ\text{C}$ ) bei dieser Konfiguration nicht überschritten wird (vgl. Aufheizkurven bei 30 V). Der Einfluss der Füllmusterorientierung ist entsprechend der experimentellen Untersuchungen in Bezug auf den spezifischen Widerstand auch in der Strom-Spannungs-Kennlinie und den Aufheizkurven deutlich sichtbar. Bei den Aufheizkurven wird der Effekt in Abhängigkeit der Erwärmung reduziert, da zum einen der Widerstand mit der Erwärmung ansteigt und zum anderen infolge einer beginnenden Erweichung des Matrixpolymers (PLA) die Hohlräume innerhalb des Schichtverbunds bei einer Temperaturdifferenz oberhalb von etwa  $40^\circ\text{C}$  gegenüber der Raumtemperatur reduziert werden [Wat19a].

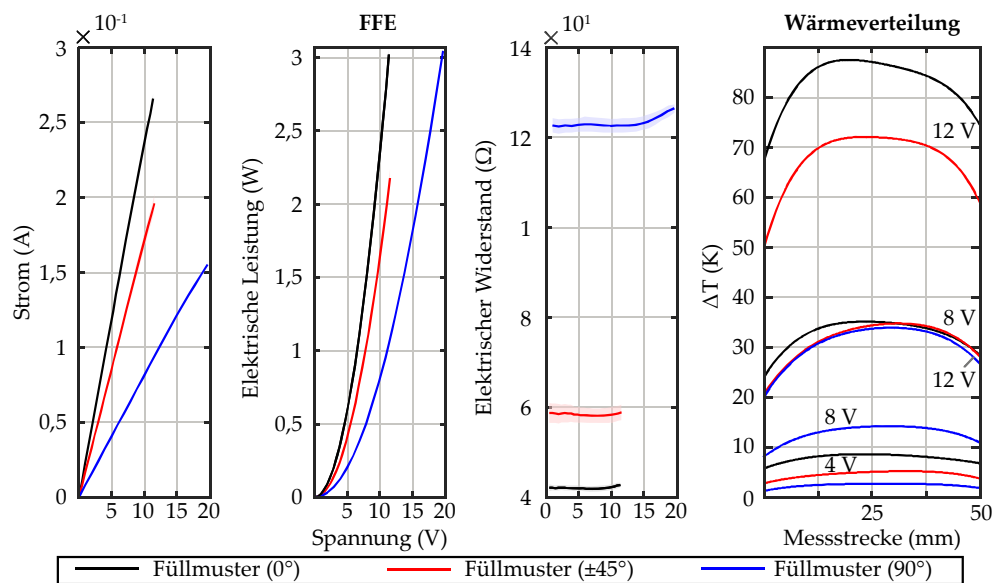


**Abbildung 7.11:** Darstellung der Strom-Spannungs-Kennlinie, der elektrischen Leistung, des Widerstands und der Aufheizkurven für PPC in Abhängigkeit von der Füllmusterorientierung (basierend auf [Wat19a])

Bedingt durch den niedrigeren elektrischen Widerstand verlaufen die Strom-Spannungs-Kennlinien bei FFE im Vergleich zu PPC deutlich steiler und die durch die Widerstandserwärmung erreichten Oberflächentemperaturen sind entsprechend höher (siehe Abbildung 7.12). Aufgrund der starken Erwärmung wird bei FFE die maximale Spannung bereits auf 12 bzw. 20 V begrenzt. Die elektrische Leistung ist bei 12 V – verglichen mit PPC – in etwa acht Mal ( $0^\circ$ ), sechs Mal ( $\pm 45^\circ$ ) bzw. drei Mal ( $90^\circ$ ) so hoch. Dies spiegelt auch die stärkere Abhängigkeit des elektrischen Widerstands von der Füllmusterorientierung wider. Weiterhin sind die Standardabweichungen des Widerstands sehr gering, sodass weder eine Verformung des Probenkörpers (siehe Abbildung C.5, Anhang C.2) noch ein mögliches Tempern durch Erweichen diesen signifikant beeinflussen. Der geringe Anstieg des Widerstands bei einem Rasterwinkel von  $90^\circ$  oberhalb von 15 V ist wahrscheinlich auf das Überschreiten der Erweichungstemperatur des Matrixpolymers (PLA) zurück-

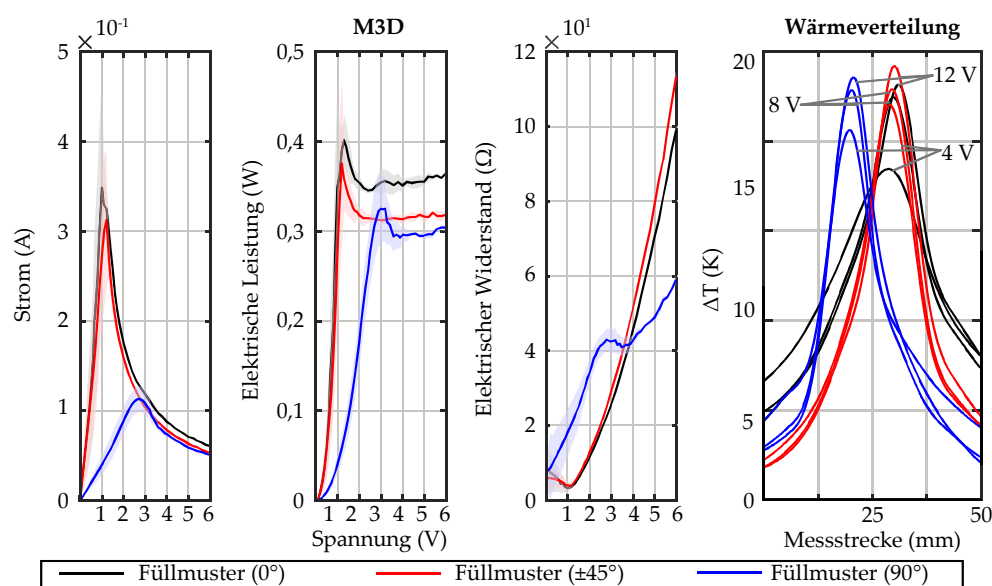


zuführen [Wat19a]. Da bei einem Rasterwinkel von  $90^\circ$  der Strom, abgesehen von den Umkehrpunkten, ausschließlich orthogonal zu den einzelnen Extrusionssträngen fließt, beeinflusst die Interdiffusionszone den Widerstand stärker als bei einem Rasterwinkel von  $0^\circ$  oder  $\pm 45^\circ$ .



**Abbildung 7.12:** Darstellung der Strom-Spannungs-Kennlinie, der elektrischen Leistung, des Widerstands und der Aufheizkurven für FFE in Abhängigkeit von der Füllmusterorientierung (basierend auf [Wat19a])

Abbildung 7.13 zeigt die Versuchsergebnisse für M3D. Die Strom-Spannungs-Kennlinie weist den steilsten Anstieg von allen untersuchten Materialien auf. Der ebenso deutliche Abfall des Stroms bzw. Anstieg des Widerstands knapp oberhalb von 1 V (Rasterwinkel von  $0^\circ$  und  $\pm 45^\circ$ ) bzw. knapp unterhalb von 3 V (Rasterwinkel von  $90^\circ$ ) ist auf ein starkes Erweichen des Matrixpolymers (PCL, Schmelzpunkt  $\approx 60^\circ\text{C}$ ) zurückzuführen. Hierdurch wird auch die maximale Oberflächentemperatur stark begrenzt. Das lokale Versagen des Probekörpers infolge der Erwärmung und des daraus resultierenden Widerstandsanstiegs ist sowohl im Wärmebild auch als am Probekörper direkt sichtbar (siehe Abbildung C.6, Anhang C.2).



**Abbildung 7.13:** Darstellung der Strom-Spannungs-Kennlinie, der elektrischen Leistung, des Widerstands und der Aufheizkurven für M3D in Abhängigkeit von der Füllmusterorientierung (basierend auf [Wat19a])

Auf Basis der durchgeführten experimentellen Untersuchungen können für die einzelnen Materialien in Kombination mit den identifizierten prozess- und geometriespezifischen Stellhebeln verschiedene Anwendungsmöglichkeiten abgeleitet werden (siehe Abschnitt 5.3 bzw. [Wat19a]). Nachfolgend werden exemplarisch unterschiedliche Anwendungen und Integrationsmöglichkeiten von wärmestrahlenden Strukturen aufgezeigt.

### 7.2.2 Exemplarische Realisierung additiv gefertigter wärmeabstrahlender Strukturen

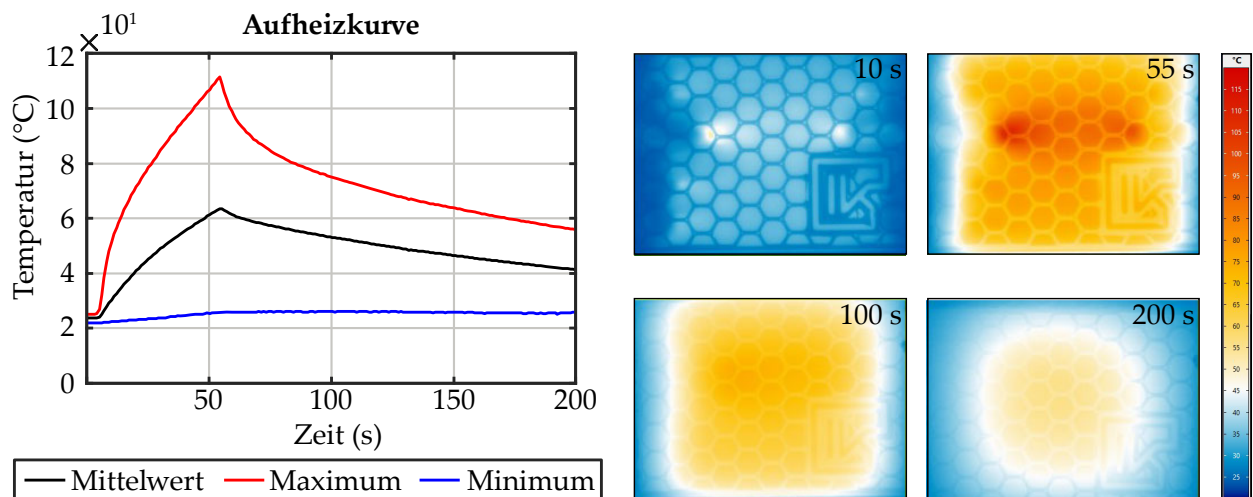
Die Materialextrusion bietet aufgrund der Multi-Material-Fähigkeit und der Möglichkeit der Verarbeitung von Kompositmaterialien mit elektrisch leitfähigen Eigenschaften das Potenzial für die Integration wärmeabstrahlender Strukturen. Wegen der erweiterten Konstruktionsfreiheit der additiven Fertigung ist die Gestaltung derartiger Funktionsflächen nicht auf horizontale oder oberflächennahe Strukturen begrenzt. Dies ermöglicht dem Produktentwickler einen großen Spielraum im Design und in der Integration additiv gefertigter wärmeabstrahlender Strukturen.

Für eine generelle Demonstration der Integration wärmeabstrahlender Funktionsflächen wird aufgrund der hohen erreichbaren Oberflächentemperaturen und des temperaturunabhängigen Widerstandsverhaltens FFE als Material ausgewählt. Als Matrixpolymer wird wegen der Materialkompatibilität ein PLA von DAS FILAMENT verwendet, welches ein thermochromes Verhalten aufweist, also in Abhängigkeit von der Temperatur ( $\approx 32\text{ °C}$ ) eine Farbänderung von Rot auf Transparent vollzieht (Abbildung 7.15). Die Abmessungen der leitfähigen Struktur werden auf  $53 \times 38,2 \times 0,8\text{ mm}^3$  festgelegt, wobei diese in das thermochrome PLA eingebettet wird. Die Oberseite wird als offene Wabenstruktur mit einer Höhe von 0,8 mm ausgeführt, um die Wärmeabstrahlung möglichst wenig zu beeinträchtigen. Als Designelement wird auf der Oberseite zusätzlich ein Logo integriert. Die Kontaktierung erfolgt mit Silberleitpaste, welche bereits in den zuvor durchgeführten Versuchen verwendet worden ist.

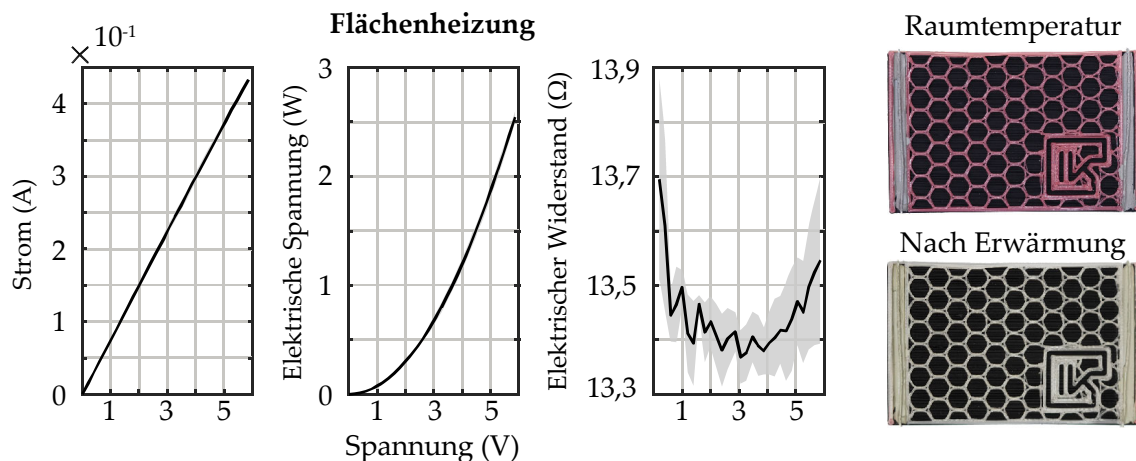
Um eine Übertragbarkeit auf eine andere Fertigungsanlage zu demonstrieren, wird ein Ultimaker 3 der Firma Ultimaker B.V. mit Doppelsextruder eingesetzt, welcher im Vergleich zum X400 (German RepRap) Halbzeuge mit einem Durchmesser von 2,85 statt 1,75 mm verwendet. Als Füllmusterorientierung wird aufgrund des geringen elektrischen Widerstands  $0^\circ$  gewählt und die übrigen Prozessparameter entsprechend der in Abschnitt 7.2.1 durchgeführten Untersuchungen festgelegt. Der resultierende spezifische Widerstand der Flächenheizung beträgt  $0,0077\text{ }\Omega\text{m}$ , was leicht oberhalb des spezifischen Widerstands des Halbzeugs von  $0,0075\text{ }\Omega\text{m}$  (vgl. Tabelle 7.6), jedoch unterhalb des ermittelten spezifischen Widerstands von  $0,0082\text{ }\Omega\text{m}$  (vgl. Abbildung 7.8) liegt. Dies könnte durch eine wirksamere Orientierung der CNT während des Extrusionsprozesses begründet sein, welche aus der stärkeren Verengung innerhalb der Düse aufgrund des größeren Halbzugsdurchmessers von 2,85 mm und gleichbleibenden Düsendurchmessers von 0,4 mm resultiert. Der resultierende elektrische Widerstand der Flächenheizungsstruktur beträgt etwa  $14\text{ }\Omega$  und liegt somit aufgrund der geänderten Geometrie unterhalb der Probenkörper (Abbildung 7.12) [Wat19a].

Die in Abbildung 7.14 repräsentierte Aufheizkurve zeigt einen steilen Anstieg der mittleren Oberflächentemperatur auf knapp  $64\text{ °C}$  nach 55 Sekunden, ausgehend von einer Umgebungstemperatur von ca.  $23\text{ °C}$ . Um eine Schädigung der Struktur zu vermeiden, wird die Spannungsversorgung zu diesem Zeitpunkt abgeschaltet, sodass die Struktur infolgedessen abkühlt und nach 200 Sekunden in etwa eine mittlere Oberflächentemperatur von  $40\text{ °C}$  erreicht. Der Mittelwert der Temperatur wird über die Gesamtfläche gemittelt, sodass dieser durch die Randbereiche und die Bereiche mit lokalen Maximaltemperaturen beeinflusst wird. Anhand der Wärmebilder kann die Oberflächentemperatur ohne den Einfluss dieser Bereiche auf  $70\text{--}75\text{ °C}$  im Vergleich zum ermittelten

Wert von etwa  $64\text{ }^{\circ}\text{C}$  abgeschätzt werden. Die Erweichungstemperatur des Matrixpolymers des FFE und des verwendeten thermochromen PLA (jeweils  $\approx 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) wird somit bereits überschritten. Die große Abweichung zwischen dem Maximal- und dem Minimalwert ist einerseits darin begründet, dass in den Bereichen der Kontaktierung die Wärmeleitfähigkeit durch die Silberleitpaste erhöht ist und somit die Wärme über die Kabel und die Umgebung schneller abgegeben wird. Andererseits führt ein Fertigungsfehler innerhalb der Funktionsfläche zu einem lokalen Anstieg des Widerstands, was in einer Erhöhung der Oberflächentemperatur in diesem Bereich resultiert (vgl. Abbildung C.6, Anhang C.2).



**Abbildung 7.14:** Darstellung der Aufheiz- und Abkühlkurve sowie der Wärmeverteilung der Oberflächentemperatur der Flächenheizungsstruktur bei einer angelegten Spannung von 6 V (vgl. [Wat19a])



**Abbildung 7.15:** Darstellung der Strom-Spannungs-Kennlinie, des Verlaufs der Leistung und des Widerstands über die Spannung sowie des Farbwechsels des Matrixpolymers (basierend auf [Wat19a])

In Abbildung 7.15 sind die Strom-Spannungs-Kennlinie sowie die elektrische Leistung und der Widerstand über der Spannung dargestellt. Diese weisen vernachlässigbar kleine Standardabweichungen zwischen den drei durchgeführten Messreihen auf, sodass aus der Reproduzierbarkeit auf eine Anwendbarkeit als Flächenheizung geschlossen werden kann. Neben den Messdaten ist auch der Farbwechsel des Matrixpolymers infolge der Erwärmung dargestellt, was eine Realisierung von Designelementen oder die Integration optischer Signale ermöglicht.

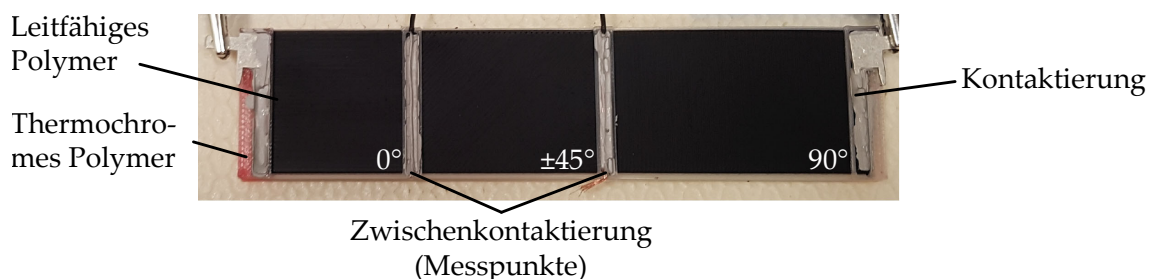
Die Versuchsergebnisse demonstrieren eine generelle technische Umsetzbarkeit und das Potenzial integrierter additiv gefertigter wärmeabstrahlender Strukturen. Speziell das CNT-gefüllte FFE

weist aufgrund der linearen Leistungscharakteristik und der Unabhängigkeit des elektrischen Widerstands von der Erwärmung sowie Verformung eine gute Eignung für diesen Anwendungsfall auf. Nachfolgend werden Möglichkeiten in Bezug auf die Einstellbarkeit der Oberflächentemperatur über die Geometriegestaltung und Prozessparametervariationen analysiert und die technische Umsetzbarkeit wärmeabstrahlender Strukturen mit komplexen Geometrien am Beispiel der Übertragung auf dreidimensionale Gitter im Allgemeinen demonstriert.

### Realisierung wärmeabstrahlender Strukturen mit variabler Oberflächentemperatur

Die MEX ermöglicht eine gezielte Einstellung der Oberflächentemperatur infolge der geometrischen und prozessparameterspezifischen Festlegung des resultierenden elektrischen Widerstands der Heizfläche. Durch eine Anpassung der Geometrie oder der Prozessparameter innerhalb der Funktionsstruktur kann eine Variation der Oberflächentemperatur erreicht und somit ein Temperaturgradient realisiert werden.

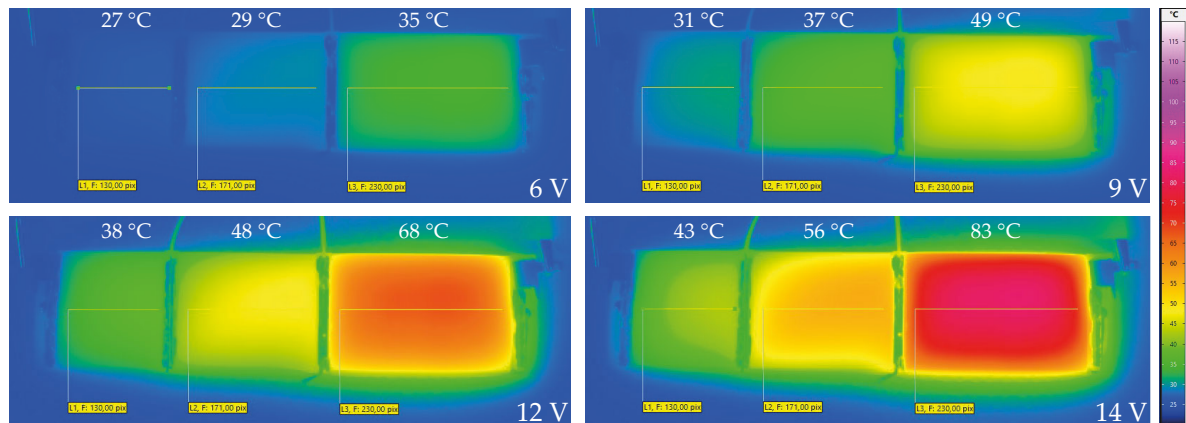
In Abbildung 7.16 ist die Flächenheizungsstruktur dargestellt, welche in einen Grundkörper aus einem thermochromen PLA integriert ist und drei Bereiche mit unterschiedlichen elektrischen Widerständen aufweist. Diese Bereiche sind als Reihenschaltung miteinander verknüpft, wobei in den Zwischenbereichen ebenfalls eine Kontaktierung zwecks Messung zur Ermittlung der Strom-Spannungs-Kennlinien eingebracht ist. Die Geometrie des ersten Segments (Rasterwinkel  $0^\circ$ ) wird auf  $27 \times 30 \times 0,8 \text{ mm}^3$ , die des zweiten ( $\pm 45^\circ$ ) auf  $36 \times 30 \times 0,6 \text{ mm}^3$  und die des dritten ( $90^\circ$ ) auf  $47 \times 30 \times 0,4 \text{ mm}^3$  festgelegt. Die Geometrie beschränkt sich auf die Bereiche zwischen der Kontaktierung. Hieraus ergibt sich für Segment eins ein resultierender Widerstand von  $7,5 \Omega$ , für Segment zwei von  $16,0 \Omega$  und für Segment drei von  $44,6 \Omega$ . Der Unterschied zwischen den Widerständen von Segment eins und zwei beträgt somit etwa Faktor 2 bzw. 6 zwischen Segment eins und drei, sodass sich hieraus unterschiedliche Leistungen und somit Oberflächentemperaturen einstellen.



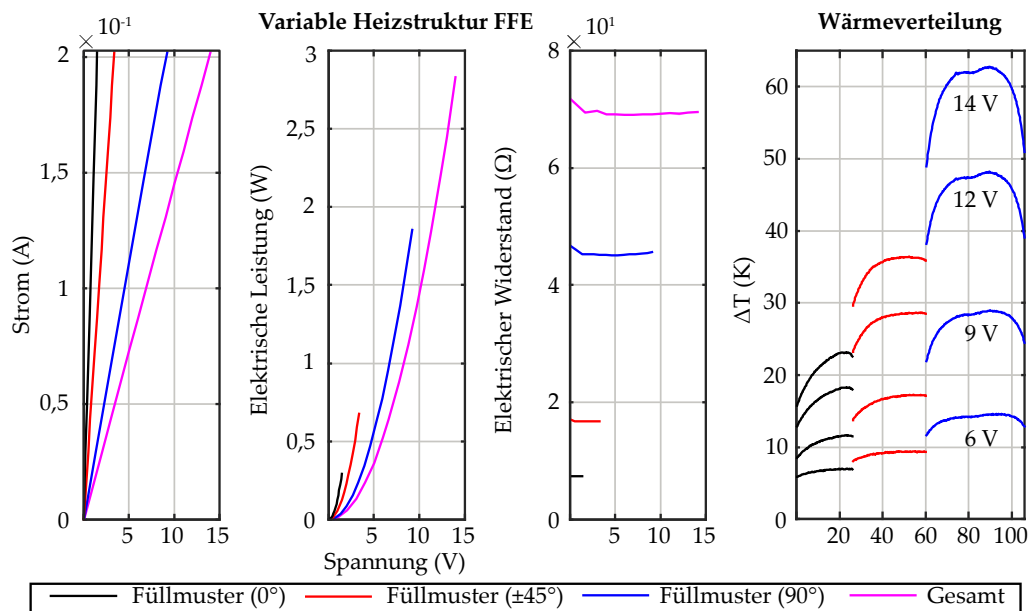
**Abbildung 7.16:** Darstellung einer integrierten Heizstruktur aus FFE mit Bereichen unterschiedlicher Geometrie und Füllmusterorientierung sowie Bereichen zur Aufnahme von Strom-Spannungs-Kennlinien

Die sich einstellende Wärmeverteilung ist in Abhängigkeit von der Spannung in Abbildung 7.17 repräsentiert. Der diskrete Übergang zwischen den einzelnen Heizsegmenten aufgrund der unterschiedlichen Widerstände infolge der Geometrie- und Rasterwinkelvariationen ist deutlich zu erkennen, wenngleich eine leichte Annäherung stattfindet (vgl. Wärmeverteilung in Abbildung 7.18). Diese Annäherung der Temperaturen zwischen den Einzelsegmenten wird jedoch durch die messtechnisch bedingte Zwischenkontaktierung infolge der gesteigerten thermischen Leitfähigkeit der Silberleitpaste und der Kabel eingeschränkt. Sowohl auf den Wärmebildern als auch in dem Diagramm der Wärmeverteilung sind die Unterschiede in den Oberflächentemperaturen deutlich zu erkennen. Dies demonstriert anschaulich die technische Umsetzbarkeit von flächigen Heizstrukturen mit variabler Wärmeabstrahlung. Die Differenz der Oberflächentemperatur entspricht aufgrund des linearen Verlaufs der Strom-Spannungs-Kennlinien infolge des Stromwärmegesetzes den Faktoren, welche sich aus den Differenzen des elektrischen Widerstands ergeben. Wie

auch bei der Flächenheizung (vgl. Abbildung 7.15) wird die Messung der Struktur drei Mal durchgeführt, wobei die Standardabweichung sehr gering ist.



**Abbildung 7.17:** Oberflächentemperatur der Flächenheizungsstruktur mit diskreten Übergängen zwischen den Einzelsegmenten für unterschiedliche Spannungen



**Abbildung 7.18:** Strom-Spannungs-Kennlinie, elektrische Leistung, elektrischer Widerstand und Aufheizkurven der Heizstruktur, gegliedert nach den Einzelsegmenten

Nachfolgend wird eine Übertragbarkeit der wärmeabstrahlenden Flächenstrukturen auf komplexe Geometrien anhand von Gitterstrukturen geprüft.

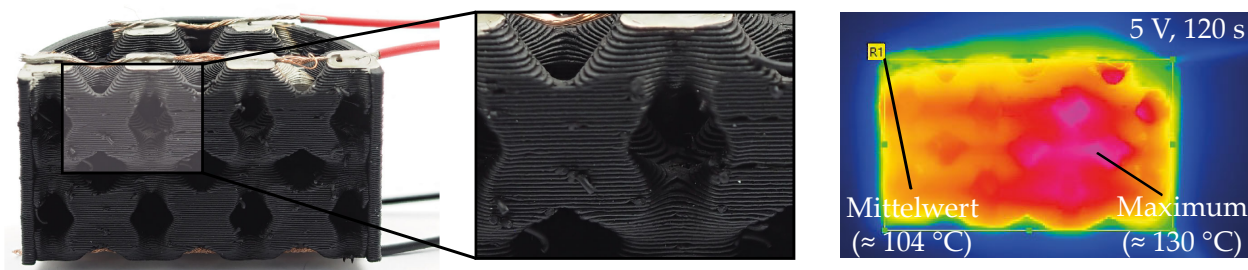
### Realisierung gitterförmiger, wärmeabstrahlender Strukturen

Zur Erstellung der gitterförmigen Strukturen wird – wie bereits in Abschnitt 6.3.2 zur Generierung formschlüssiger Verbindungen zur Steigerung der Verbundfestigkeit – die Software Grasshopper und das Plug-in Crystallon genutzt. Die Gitterstruktur wird in ein kreisförmiges Element mit einem Innendurchmesser von 35 mm und einer Wandstärke von 0,8 mm integriert, wobei die Teststruktur im Schnitt gefertigt wird, um die Charakterisierung mittels Thermographiekamera zu erleichtern. Die Gitterzellen werden quadratisch angeordnet und mit dem Kreissegment verschnitten. Die Zellanzahl wird auf 5x5x2 Zellen (quadratische Anordnung) in Länge, Breite und Höhe festgelegt



(siehe Abbildung 7.19). Die Zellhöhe und -breite betragen jeweils 10 mm und der Stabdurchmesser 3,6 mm. Als Zellgeometrie wird eine kubisch-raumzentrierte Anordnung ohne horizontale und vertikale Verstrebungen gewählt. Die Konturanzahl beträgt für das Kreissegment und die Gitterstruktur jeweils zwei, während der Füllgrad zu 100% bestimmt wird, um einen möglichst geringen elektrischen Widerstand zu erhalten. Aufgrund der guten elektrischen Leitfähigkeit und dem temperaturunabhängigen Widerstandsverhalten wird als Material FFE verwendet. Die Wahl der Extrusionstemperatur, der Verfahrensgeschwindigkeit und der Flussrate werden im Vergleich zu den vorherigen Versuchen zu den Flächenheizungen nicht verändert.

Die Kontaktierung der leitfähigen Struktur wird mit Silberleitpaste an den Knotenpunkten an der Ober- und an der Unterseite realisiert. Die Zellen werden pro Seite in Reihe und diese anschließend parallel zueinander geschaltet. Aus dieser Anordnung resultiert ein elektrischer Widerstand von  $3,6 \Omega$ . In Abbildung 7.9 sind die additiv gefertigte Gitterstruktur mit der Kontaktierung und die resultierende Wärmeverteilung bei einer Spannung von 5 V nach 120 Sekunden dargestellt. Die Raumtemperatur zu Beginn der Messung beträgt  $23^\circ\text{C}$  und die elektrische Leistung ca. 9,7 W.

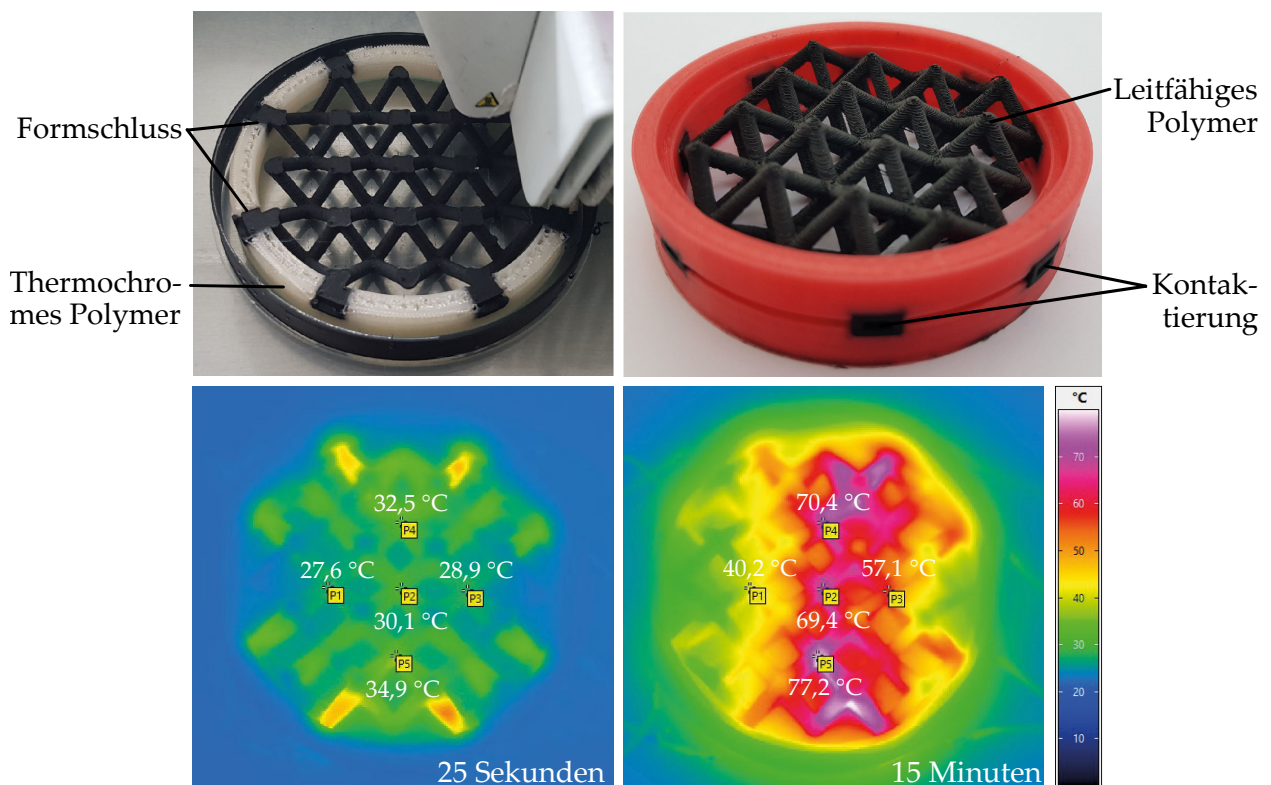


**Abbildung 7.19:** Additiv gefertigte Gitterstruktur aus dem CNT-gefüllten elektrisch leitfähigen Polymer (FFE) und eine Wärmebildaufnahme bei einer angelegten Spannung von 5 V nach 120 Sekunden

Der Mittelwert, der sich in dem Bereich einstellenden Oberflächentemperatur, innerhalb des Messbereichs beträgt nach 120 Sekunden etwa  $104^\circ\text{C}$  und das im mittleren rechten Bereich der Struktur erreichte Maximum ca.  $130^\circ\text{C}$ . Die Temperaturdifferenz an der Ober- und Unterseite liegt in der höheren thermischen Leitfähigkeit durch die Kontaktierung begründet. Die Randbereiche werden hingegen aufgrund des geringeren Querschnitts und des Stromflusses nicht so stark erwärmt. Wegen der unterschiedlichen Geometrien bzw. Querschnittsflächen innerhalb der Gitterstruktur ergeben sich Widerstandsänderungen, die wiederum in einer inhomogenen Wärmeerzeugung resultieren (vgl. Abbildung 7.17). Dieser Effekt wird zusätzlich durch Fehlstellen im rechten Bereich der Gitterstruktur verstärkt. Diese Tatsachen stellen eine Herausforderung in der Konstruktion und Fertigung dar, bieten aber auch einen Stellhebel (u.a. Zellgeometrie und Wahl des Stabdurchmessers) in der Gestaltung von Gitterstrukturen zur Wärmeerzeugung. In diesem Kontext sind sowohl die Anordnung der Gitterstrukturen (Reihen- und Parallelschaltung) im Widerstandsnetzwerk als auch das Verhältnis zwischen Stabdurchmesser und der Geometrie der Knotenpunkte relevant.

Eine Anwendung von solchen additiv gefertigten gitterförmigen Strukturen wäre beispielsweise in durchströmten Kanälen denkbar. Eine generelle technische Umsetzbarkeit der Integration einer leitfähigen Struktur in ein Teilstück eines Kanals mittels MMM ist in Abbildung 7.20 gezeigt. Die Verbindung zwischen dem thermochromen PLA und dem leitfähigen Polymer (PPC) wird durch eine formschlüssige Verbindung realisiert. Diese Anbindungspunkte stellen gleichzeitig die Kontaktierungspunkte der Gitterstruktur dar, wobei jeweils vier dieser Punkte mittels Kabel parallelschaltet werden. PPC ist aufgrund der einfacheren Verarbeitung im Vergleich zu FFE gewählt

worden, um Fertigungsfehler zu reduzieren. Die Wärmebildaufnahmen zeigen die Wärmeverteilung nach 25 Sekunden und nach 15 Minuten bei einer angelegten Spannung von 30 V, welche in ersten Versuchen ermittelt worden sind. Die resultierende elektrische Leistung im stationären Zustand beträgt ca. 3,1 W. An den oberen und unteren Kontaktierungspunkten sind deutliche lokale Erwärmungen zu erkennen. Dies ist auf die im Vergleich zur Gitterstruktur geänderte Geometrie an den Kontaktierungspunkten und dem daraus resultierenden elektrischen Widerstand zurückzuführen. Aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Widerstands des PPC (siehe Abbildung 7.11) verstärkt sich die Inhomogenität bei zunehmender Erwärmung, was bei einem Vergleich zwischen den Aufnahmen nach 25 Sekunden und 15 Minuten zu erkennen ist. Nach 15 Minuten zeichnet sich ein leicht außermittiger Temperaturbereich mit konstantem Temperaturniveau von etwa 70 °C ab, wobei die Temperatur an der unteren Kontaktierungsstelle erhöht ist.



**Abbildung 7.20:** Darstellung einer dreidimensionalen Gitterstruktur aus PPC zur Integration in eine Luftführung in Multi-Material-Bauweise während des Herstellungsprozesses sowie nach Fertigstellung mit dazugehörigen Wärmebildaufnahmen bei einer Spannung von 30 V

Die Wärmebildaufnahmen zeigen einerseits eine Realisierung komplexer leitfähiger Strukturen zur Wärmeerzeugung auf, machen andererseits aber auch die Herausforderungen in der Gestaltung in Bezug auf die Wahl der Geometrie und die Kontaktierung deutlich. Eine detaillierte Analyse der genauen Ursachen für die Inhomogenität in der Wärmeverteilung sowie eine Ableitung konstruktiver Maßnahmen zu deren Behebung bzw. Reduzierung sind jedoch nicht Teil dieser Arbeit.

Die ermittelten Kennwerte sowie material-, geometrie- und prozessparameterspezifische Einflussfaktoren dienen nachfolgend als Grundlage für die prototypische Umsetzung der Wissensbereitstellung. Diese ist samt beispielhafter Anwendung in Abschnitt 7.3 aufgeführt.

## 7.3 Prototypische Umsetzung und Anwendung der Wissensbereitstellung

In diesem Abschnitt wird auf der Grundlage der identifizierten Konstruktionsprinzipien für die MMM und der experimentellen Untersuchungen die prototypische Umsetzung der Wissensbereitstellung als Graphendatenbank beschrieben. Die Anwendung wird anschließend exemplarisch am Beispiel der Neukonzeption einer Fingerprothese durchgeführt, wobei das entwickelte Lösungskonzept prototypisch mittels MMM gefertigt und die generelle Funktion aufgezeigt wird.

### 7.3.1 Prototypische Umsetzung des Wissenssystems

Der Aufbau des Wissenssystems basiert auf den Ausführungen in Abschnitt 4.2. Die Struktur ist so gewählt, dass diese als Graphendatenbank realisiert werden und ein Zugriff auf die Inhalte web-basiert erfolgen kann. Die Realisierung als interaktives System verfolgt primär das Ziel einer Verknüpfung der Inhalte, um auf diese Weise die Anwender zu entlasten. Weiterhin ermöglicht diese Art der Umsetzung u.a. die Implementierung von Filter- und Sortierfunktionen, die eine zusätzliche Entlastung der Anwendenden bewirken können. Abbildung 7.21 zeigt den Einstieg in das Graphendatenbanksystem über die funktionsorientierte Zugriffslogik auf die implementierten Konstruktionsprinzipien (vgl. Tabelle A.2, Anhang A.1). Um eine Vorauswahl in Bezug auf die zu realisierenden Funktionen zu erleichtern, wird ein Hover-Effekt implementiert. Dieser bewirkt einerseits eine Anzeige des Titels des Prinzips direkt am Mauszeiger und stellt andererseits ausgewählte Inhalte des Prinzips im unteren Bereich dar. Durch ein Anwählen des Prinzips werden diese Inhalte dauerhaft angezeigt. Auf deren Grundlage kann eine erste Beurteilung der Eignung des Konstruktionsprinzips für die jeweilige technische Problemstellung durch die Erläuterung des Funktionsprinzips und die Zuordnung zu konstruktiven Zielstellungen erfolgen. Die Übertragung auf den jeweiligen Kontext wird durch eine allgemeine Beschreibung des Prinzips sowie das Aufzeigen einer Nutzung anhand von Anwendungsfällen erleichtert (Abschnitt 5.3).

**Funktionsmatrix**

Speichern/Bearbeiten | Einigen | Wandeln | Leiten | Umformen | Verzweigen

Funktion	Speichern/Bearbeiten	Einigen	Wandeln	Leiten	Umformen	Verzweigen
Energie	P23 P07 P22 P13 P09 P08 P06 P05 P02		P07 P21 P20 P19 P18 P16 P15 P13 P12 P11 P10 P09 P08 P17	P07 P14 P09 P08 P03 P01 P04 P02	P11 P10	P07 P13
Stoff	P06 P04 P03			P22	P22 P21 P20 P19 P18 P17 P11 P06 P05 P04 P02 P01	
Information	P16 P15 P12 P11 P10 P19					

**Funktionsprinzip des Akustischen Schwarzen Lochs (ASL)**

Eine definierte Schwächung des Bauteilquerschnitts führt zu einer Minimierung der Geschwindigkeit der Biegeverformung in einer Schwingstruktur und einem Anstieg der Amplitude. Dies ermöglicht eine lokale Integration passiver Dämpfungsstrukturen durch ein flexibles Material.

**Integration von passiven Dämpfungsstrukturen durch eine Kombination von starren und flexiblen Materialien**

**Generelle Beschreibung**

**Allgemeine Beschreibung des Konstruktionsprinzips**

Durch eine Kombination von flexiblen und starren Materialien und unter Verwendung einer entsprechenden Formfunktion (siehe Prinzip des ASL) können lokal dämpfende Strukturen realisiert werden. Durch den Multi-Material-Druck lassen sich derartige Elemente in bestehende Strukturen ohne eine Beeinträchtigung der äußeren Bauteilgestalt integrieren. Hierdurch besteht Potenzial zur Gewichtsreduzierung.

**Integration passiver Dämpfungsstrukturen mittels Methode der ASLs**

Eine Integration von ASLs mittels konventioneller spanender Fertigungsverfahren ist mit hohem Aufwand und somit Kosten verbunden. Die additive Fertigung bietet hingegen durch die Formkomplexität und den Multi-Material-Druck konstruktive Freiheiten, welche ohne nennenswerten Mehraufwand in der Fertigung und ohne zusätzliche Montage Schritte eine Integration derartiger Dämpfungsmaßnahmen ermöglichen.

**Beeinflusste konstruktive Zielstellungen**

Akustische Eigenschaften  
Bauteilanzahl/Montage  
Fertigungsaufwand  
Bauteilgewicht  
Bauraum

Entwicklungsaufwand

Exemplarische Darstellung der Integration eines ASLs in eine Plattenstruktur

**Abbildung 7.21:** Screenshot des Datenbanksystems mit Darstellung des funktionsorientierten Zugriffs und Beschreibung des Konstruktionsprinzips zur Integration von passiven Dämpfungsstrukturen [Wat19c]



Wird eine generelle Eignung des Konstruktionsprinzips für die vorliegende Problemstellung festgestellt, können spezifischere Inhalte des Prinzips angezeigt werden (siehe Abbildung 7.22). Hierdurch kann eine Konkretisierung des gewählten Lösungsprinzips erfolgen, indem eine Verknüpfung mit geometrischen und stofflichen Merkmalen unterstützt wird. Die bereitgestellten Informationen beziehen sich auf die konstruktiven und prozessseitigen Möglichkeiten zur Beeinflussung der prinzipbezogenen Eigenschaften sowie auf grundsätzliche Hinweise, die eine realistischere Einschätzung im Hinblick auf die technische Umsetzbarkeit fördern. Die Verknüpfung der Prinzipien mit Materialeigenschaften und verfügbaren Materialien für die MEX bildet zudem die Grundlage für eine Gegenüberstellung von erreichbaren Bauteileigenschaften und Anforderungen. Weiterhin wird hierdurch die Bereitstellung von Informationen über die Kompatibilität ausgewählter Materialkombinationen ermöglicht, welche matrixförmig dargestellt ist. Durch ein Anwählen eines Materials wird der Bereich der erzielbaren Eigenschaften angezeigt, sodass hierdurch eine Eignung auf die jeweilige technische Problemstellung geprüft werden kann. Zudem werden hierdurch die geometrie- und prozessspezifischen Einflüsse quantitativ aufgezeigt.

**Funktionsprinzip des Akustischen Schwarzen Lochs (ASL)**

eine definierte Schwächung des Bauteilschnitts führt zu einer Minimierung der Geschwindigkeit der Biegeverformung in einer Schwingstruktur und einem Anstieg der Amplitude. Dies ermöglicht eine lokale Integration passiver Dämpfungsstrukturen durch ein flexibles Material.

**Beeinflusste konstruktive Zielstellungen**

Positive Einflüsse	Akustische Eigenschaften	Entwicklungsaufwand
Bauteileigenschaften	Bauteileigenschaften	
Fertigungsaufwand		
Bauteilgewicht		
Bauraum		
Negative Einflüsse		

**Integration von passiven Dämpfungsstrukturen durch eine Kombination von starren und flexiblen Materialien**

**Generelle Beschreibung**

**Allgemeine Beschreibung des Konstruktionsprinzips**

Durch eine Kombination von flexiblen und starren Materialien und unter Verwendung einer entsprechenden Formfunktion (siehe Prinzip des ASL) können lokal dämpfende Strukturen realisiert werden. Durch den Multi-Material-Druck lassen sich derartige Elemente in bestehende Strukturen ohne eine Beeinträchtigung der äußeren Bauteilgestalt integrieren. Hierdurch besteht Potenzial zur Gewichtsreduzierung.

**Integration passiver Dämpfungsstrukturen mittels Methode der ASLs**

Eine Integration von ASLs mittels konventioneller spanender Fertigungsverfahren ist mit hohem Aufwand und somit Kosten verbunden. Die additive Fertigung bietet hingegen durch die Formkomplexität und den Multi-Material-Druck konstruktive Freiheiten, welche ohne nennenswerten Mehraufwand in der Fertigung und ohne zusätzliche Montageschritte eine Integration derartiger Dämpfungsmaßnahmen ermöglichen.

**AM-spezifische Stellhebel zur Beeinflussung des Konstruktionsprinzips**

**Form des Akustischen Schwarzen Lochs**

Die Form kann in Abhängigkeit des jeweiligen Anwendungsfalls variiert werden, wobei die Höhe des auslaufenden Endes minimal sein sollte. Dies ermöglicht u.a. eine Einkapselung der Dämpfungsstruktur, so dass die äußere Bauteilgestaltung nicht beeinflusst wird.

**Nutzen der Anisotropie der mechanisch-technologischen Eigenschaften**

Die Wirksamkeit der Maßnahme steigt mit dem Stützpunktunterschied zwischen der Bauteilstruktur und dem eigenschwingenden Bauteil. Die Biegefestigkeit der Bauteilstruktur kann dabei einerseits über die Materialauswahl und die Bauteilorientierung sowie andererseits über die Geometrie und die Wahl der Prozessparameter (u.a. Rasterwinkel, Flausrate, Extrusionsgeschwindigkeit) beeinflusst werden. Bei faserverstärkten Materialien ist infolge der Faserorientierung der Anstieg entlang der Extrusionsrichtung besonders hoch.

**Allgemeine konstruktive Hinweise in Bezug auf die technische Umsetzbarkeit**

**Bauteilorientierung und Wahl der Schichtdicke**

Durch die Bauteilorientierung und die gewählte Schichtdicke wird die Form des ASL in Abhängigkeit von der minimalen Auflösung an die definierte Formfunktion angenähert. Die Orientierung und die Schichtdicke wirken sich zudem auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften (u.a. Biegefestigkeit) aus. Um die Form möglichst exakt abzubilden, sollte die Schichtdicke so gering wie möglich gewählt werden.

**Berücksichtigung der Materialkompatibilität**

Bei der Integration einer dämpfenden Struktur muss zwingend eine ausreichend hohe Verbundhaftung zwischen den zu kombinierenden Materialien vorherrschen. Eine Einkapselung des ASL wirkt eine Ablösung entgegen. Als Maßnahmen zur Steigerung der initialen Verbundhaftung kann z.B. eine Plasmaoberflächenbehandlung durchgeführt werden, wofür eine formchlüssige Verbindung aufgrund der Funktionsprinzipien technisch nicht umsetzbar ist.

**Materialauswahl**

**Dashboard**

Suche

P02

Abriebfestigkeit

Biegefestigkeit

**Biegemodul**

Biokompatibilität

Bruchdehnung

Chemische Beständigkeit

E-Modul

**Materialkompatibilität**

Material	GF30-PA6	PLA	XTCF20	XT
GF30-PA6	Grün	Grün	Grün	Grün
PLA	Grün	Grün	Grün	Grün
XTCF20	Grün	Grün	Grün	Grün
XT	Grün	Grün	Grün	Grün

**Abbildung 7.22:** Screenshots des Datenbanksystems mit Darstellung der Stellhebel und der Konstruktionshinweise (oben) sowie den Materialkompatibilitäten (unten) [Wat19c]

Die aufgeführten Materialien werden nach der jeweils zur Realisierung des Prinzips erforderlichen Eigenschaft (z.B. Steifigkeit oder elektrische Leitfähigkeit) aufgeführt. Eine Vorsortierung im Hinblick auf die quantitative Ausprägung der jeweiligen Eigenschaft ist noch nicht implementiert (vgl. Abschnitt 4.2.2). Diese Vorsortierung würde die Auswahl einer geeigneten Materialkombination für den Anwendenden erleichtern, da in deren Auswahl vorrangig die Verbundhaftung betrachtet werden könnte. Für eine Kombination von zwei starren Materialien wird die Verbundhaftung standardmäßig auf Zugbelastung und für die Kombination von starren und flexiblen Materialien auf den Widerstand gegen Schälung festgelegt. Die zunächst qualitativ angezeigte farbliche Bewertung der Verbundhaftung kann durch ein Anwählen des Feldes quantitativ und gegliedert nach Belastungsart eingesehen werden, um zu prüfen, ob diese für den vorliegenden Anwendungsfall ausreichend ist oder evtl. Zusatzmaßnahmen zur Erhöhung der Verbundfestigkeit notwendig sind. Außerdem sind – sofern untersucht – Zusatzmaßnahmen zur Steigerung der Verbundhaftung aufgeführt. Um weitere Randbedingungen der technischen Problemstellung mit in die Entscheidung der Materialauswahl einzubeziehen, steht noch die Implementierung einer Filterfunktion aus, welche z.B. eine bestimmte Temperaturbeständigkeit der Materialien berücksichtigt.

Die identifizierten Konstruktionsprinzipien (Tabelle A.1 und Tabelle A.2, Anhang A.1) und die experimentell ermittelten Kennwerte (Abschnitte 7.1 und 7.2) werden in das Graphendatenbanksystem eingepflegt, um die Anwendung exemplarisch anhand der Neukonzeption zur Umgestaltung einer Handprothese zu demonstrieren.

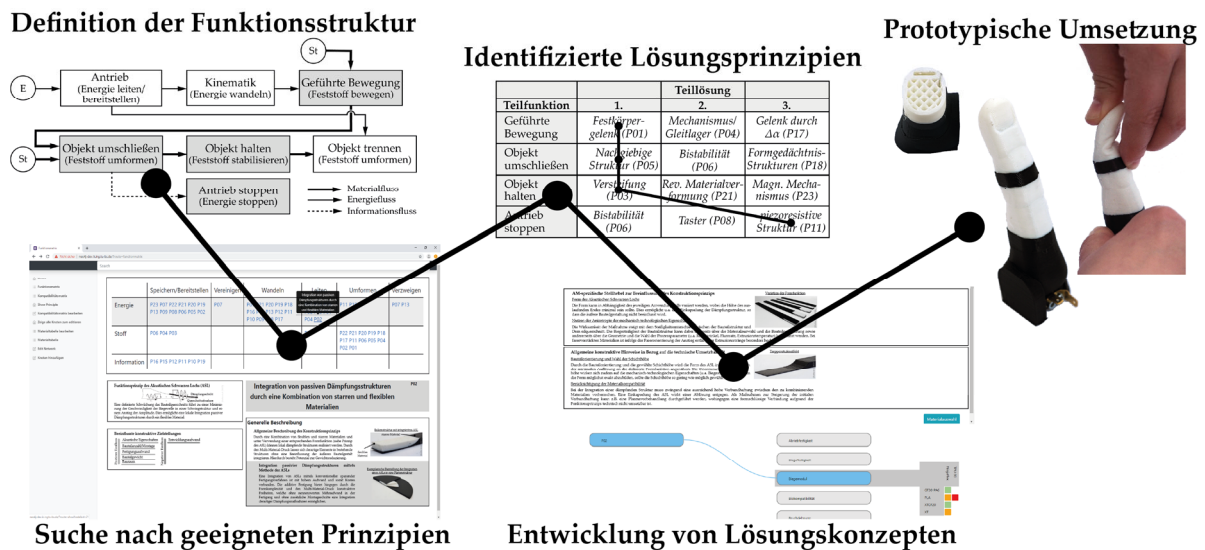
### 7.3.2 Exemplarische Anwendung der Wissensbereitstellung

Die Anwendung der Wissensbereitstellung für die MMM erfolgt am Beispiel einer Handprothese, da diese bereits erfolgreich mittels MEX hergestellt und eine Vielzahl an unterschiedlichen Varianten eingesetzt wird. Der Antrieb erfolgt in der Regel mit Hilfe eines Seilzugs (u.a. [Ena19a]). Die Motivation für die Realisierung mittels MEX liegt v.a. in den geringen Herstellungskosten, der schnellen Verfügbarkeit und der einfachen Anpassbarkeit der Geometrie aufgrund der Werkzeugunabhängigkeit begründet. Hierdurch wird speziell Kindern und Jugendlichen eine kostengünstige Alternative zu herkömmlichen und vergleichsweise kostenintensiven Prothesen geboten, da ein häufiger Austausch und somit eine kontinuierliche Anpassung an die infolge des Wachstums veränderliche Anthropometrie möglich wird. [Ena19b].

Bisher werden die Potenziale der MMM in der Gestaltung der Prothesen nicht berücksichtigt. Die Prothesen bestehen vor allem aus einzelnen starren oder flexiblen Segmenten, die durch Stifte zusammengesetzt bzw. formschlüssig montiert werden. Aktuelle Ansätze zeigen eine Integration sensorischer Elemente. Zur besseren Anpassbarkeit der Prothese an die jeweilige Anthropometrie wird die Integration piezoresistiver Strukturen mittels pastenbasierter additiver Verfahren zur Messung der Kraft am Armstumpf untersucht [Ton19]. Wang et al. (2019) [Wan19] zeigen außerdem die additive Fertigung und generelle Integration eines Druck- bzw. Temperatursensors an einer Handprothese mit einem pastenbasierten Extrusionsprozess auf.

In Abbildung 7.23 ist das zur Neukonzipierung der Handprothese angewendete Vorgehen dargestellt, welches an das in Abschnitt 5.4 entwickelte und evaluierte Vorgehen angelehnt ist. Dieses umfasst zunächst das Aufstellen einer Funktionsstruktur, welche die Basis für die Identifikation potenzieller Konstruktionsprinzipien bildet. In einem weiteren Schritt werden die identifizierten Prinzipien anhand der Beschreibungen auf ihre Eignung in Bezug auf die technische Problemstellung geprüft. Die anschließende Konkretisierung des Lösungsprinzips hin zu einem Konzept er-

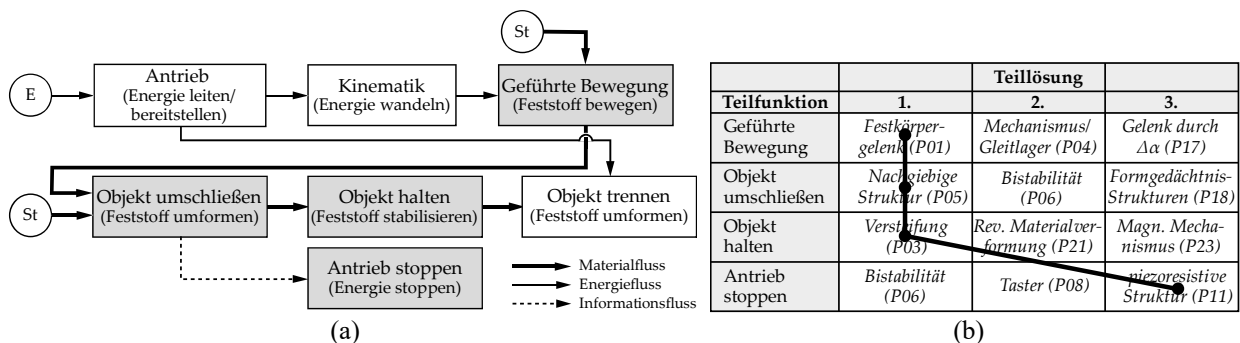
folgt durch die Anwendung der genannten Stellhebel und Konstruktionshinweise sowie unter Einbeziehen der Materialkompatibilität. Eine Evaluation des Konzepts erfolgt auf der Grundlage von einer prototypischen Umsetzung bzw. additiven Fertigung eines einzelnen Fingers.



**Abbildung 7.23:** Vorgehen zur Neukonzeption der Handprothese unter Berücksichtigung der konstruktiven Möglichkeiten der MMM und der Nutzung des Datenbanksystems (basierend auf [Wat19c])

Der generelle Funktionsumfang wird auf der Grundlage der bestehenden Prothesen festgelegt (siehe [Ena19a]). Zusätzlich soll das Funktionsspektrum dahingehend erweitert werden, dass das Greifen eines Objekts detektiert wird, um hierdurch bspw. ein Signal an die Nutzenden zu senden oder einen elektrischen Antrieb zu stoppen. Als Anforderungen werden eine hohe Robustheit des Bewegungsmechanismus, eine Anpassbarkeit der Fingergeometrie an die zu greifenden Objekte sowie eine hohe Rückstellkraft festgelegt. Die fertigungstechnischen Randbedingungen bezüglich Bauraum, Anzahl der Extruder und minimale Auflösung werden durch die Verwendung der Fertigungsanlage (X400 der Firma German RepRap) bestimmt.

Im Fokus der nachfolgenden Betrachtungen zur Identifikation von Lösungsideen und der Entwicklung eines Lösungskonzepts stehen die in Abbildung 7.24 (a) grau hinterlegten Teilfunktionen: Geführte Bewegung realisieren, Objekt umschließen, Objekt halten und Antrieb stoppen. Durch eine Verallgemeinerung dieser Funktionen – siehe in Klammern aufgeführte allgemeine Größen und Operationen – wird eine Identifikation von Konstruktionsprinzipien anhand des Wissenssystems ermöglicht. Eine Auswahl potenziell anwendbarer Prinzipien ist gegliedert nach Teilfunktionen in Abbildung 7.24 (b) dargestellt.



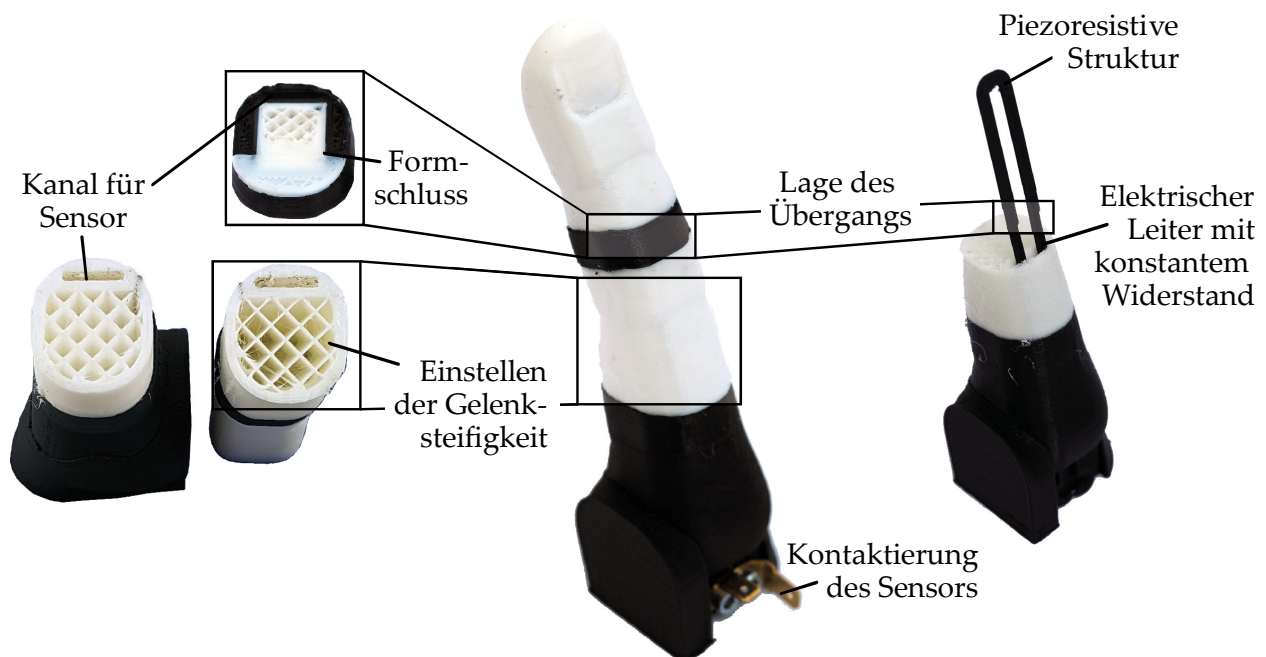
**Abbildung 7.24:** (a) Funktionsstruktur zur Identifikation von Konstruktionsprinzipien (grau hinterlegt) und (b) Morphologischer Kasten mit identifizierten Teillösungen zur Realisierung der Teilfunktionen

Die Auswahl der einzelnen Teillösungen wird nachfolgend beschrieben, um die Anwendung auf Inhalte bzw. Informationen des Wissenssystems im Hinblick auf eine Bewertung der Eignung der identifizierten Prinzipien und auf die Entwicklung von Lösungskonzepten zu demonstrieren:

- *Geführte Bewegung realisieren:* Die Realisierung eines Gelenks durch die Nutzung der unterschiedlichen Wärmeausdehnungen von zwei Materialien (P17) wird ausgeschlossen, da einerseits der Grad der Bewegung und somit die Zustellung begrenzt ist und andererseits zur Realisierung des Prinzips zusätzlich thermische Energie bereitgestellt werden müsste. Gegen die Anwendung von P04 – Integration von Lagern – spricht der zusätzliche Nachbearbeitungsaufwand infolge der prozessbedingten Fertigungstoleranzen und der Mehraufwand gegenüber dem bereits funktionierenden System. Die Integration von Festkörpergelenken durch die lokale Verwendung von flexiblen Materialien (P01) eignet sich hingegen im Hinblick auf die Realisierung großer Verformungen gut für das Anwendungsbeispiel der Handprothese. Durch einen großen Gestaltungsspielraum im Hinblick auf geometrische und prozessspezifische (u.a. Füllgrad und -muster) Möglichkeiten zur Einstellung der Gelenksteifigkeit ergeben sich weitere Vorteile. Zudem erlaubt die Verwendung von Festkörpergelenken eine Annäherung der äußeren Kontur der Prothese an die Form von realen Fingern (Ästhetik).
- *Objekt umschließen:* Zur Erfüllung dieser Funktion wird P05 gewählt, da die Integration nachgiebiger Strukturen passiv erfolgt und grundsätzlich mit P01 aus der vorherigen Teilfunktion kombinierbar ist. Die konstruktiven Freiheiten zur Einstellung der Nachgiebigkeit sind äquivalent. Nachteilig an der Anwendung von P06 und P18 sind, dass das Umschließen aktiviert bzw. wieder deaktiviert werden muss. Der Bistabilitätsmechanismus (P06) muss durch eine Verformung aktiviert und auch zum Loslassen des Objekts wiederum deaktiviert werden. Die Verwendung von SMP ermöglicht einerseits durch eine plastische Verformung ein Umschließen des Objekts, andererseits ist aber zur Herstellung der ursprünglichen Geometrie eine Aktivierung (z.B. thermisch) erforderlich, sodass diese zusätzlich bereitgestellt werden müsste.
- *Objekt halten:* Durch die plastische Verformung des SMP (P21) kann die erforderliche Kraft zum Halten des Objekts aufgebracht werden, erfordert jedoch wiederum eine Aktivierung zur Herstellung des Ursprungszustands (siehe *Objekt umschließen*). Das Prinzip der Verwendung von Materialien mit magnetischen Eigenschaften (P23) ist hingegen auf das Fixieren von Objekten aus magnetischen Werkstoffen begrenzt. Zudem wird die Kraft durch den Füllstoffanteil limitiert. Durch eine Integration von lokalen Versteifungsstrukturen (P03) wird die Haltekraft der Fingerstruktur erhöht, sodass Objekte fixiert werden können. Aufgrund der Einfachheit der technischen Umsetzbarkeit sowie einer einfachen Kombination mit P01 und P05 wird P03 für die Realisierung der Teilfunktion *Objekt halten* gewählt.
- *Antrieb stoppen:* Zum Stoppen des Antriebs werden ein passivier (P06) und zwei aktive Mechanismen (P08 und P11) identifiziert. Die Bistabilität (P06) begrenzt die Bewegung aufgrund des Widerstands, welchen das zu greifende Objekt dem Mechanismus entgegenbringt, passiv. Hierdurch ist jedoch keine aktive Rückmeldung an den Nutzenden der Prothese möglich. Das Prinzip des Tasters (P08) schließt durch eine Verformung einen Schaltkreis und kann so eine aktive Rückmeldung an den Nutzenden senden. Dies setzt jedoch eine definierte Bewegung voraus, was evtl. bei Abweichungen von dieser eine Auslösung verhindern könnte. Aus diesem Grund wird sich für die Integration eines piezoresistiven Sensors (P11) entschieden, welcher das Nachgeben (P05) infolge des *Umschließen des Objekts* detektiert.

Basierend auf dieser Auswahl von Lösungsprinzipien zur Realisierung der Teilfunktionen kann mit Hilfe der bereitgestellten Informationen bezüglich der Stellhebel und Konstruktionshinweise sowie Materialeigenschaften und -kompatibilitäten eine Verknüpfung mit geometrischen und stofflichen Merkmalen erfolgen und ein Lösungskonzept entwickelt werden. Die technische Umsetzung der Handprothese mittels MMM ist anhand eines einzelnen Fingers in Abbildung 7.25 demonstriert. Aufgrund der Limitierung durch zwei Extruder erfolgt die Fertigung in zwei Bauteilen (Finger und Sensor), die jeweils zwei Materialien kombinieren. Nachfolgend wird die Umsetzung der einzelnen Teilfunktionen durch die gewählten Prinzipien beschrieben.

Die Nutzung von Festkörpergelenken ermöglicht eine große Freiheit in der Wahl der Außenkontur, weshalb die Form der Prothese an die reale Form eines Fingers angelehnt werden kann. Die Gelenksteifigkeit wird hierbei durch die Wahl des Füllmusters, den Grad der Füllung und die Anzahl der Außenkonturen eingestellt, wobei keine Gradierung vorgesehen wird. Die Führung der Bewegung wird zusätzlich durch die Form der Gelenke unterstützt. Als Material für den flexiblen Teil wird NinjaFlex® und für den starren Teil wird aufgrund der Biokompatibilität PLA gewählt. Um eine sichere Anbindung der Gelenke an die starren Teile zu gewährleisten, wird eine zusätzliche formschlüssige Verbindung gewählt. Diese wird sowohl in Bauebene (Verzahnung durch Überlappung) als auch in Baurichtung – durch eine Fortführung des flexiblen Materials innerhalb der starren Struktur – realisiert. Der obere Bereich der Fingerspitze ist ebenfalls flexibel ausgeführt, um eine Anpassung an die zu greifenden Objekte zu gewährleisten. Da die Anzahl der Extruder auf zwei limitiert ist, wird die Versteifung (P03) indirekt mit Hilfe des piezoresistiven Sensors (P11) umgesetzt. Durch die Umrandung des Kanals für die Sensorintegration wird dieser Bereich zusätzlich versteift, was die Haltekraft erhöht.



**Abbildung 7.25:** Additiv gefertigter Prototyp der Handprothese mit Darstellung einzelner Konstruktionsmerkmale; zweiteilige Struktur, bestehend aus Finger und Sensor, jeweils in Multi-Material-Bauweise hergestellt (Fingergeometrie angelehnt an [Sch12])

Der Sensor ist, wie der Finger, als MMB ausgeführt, da lediglich im oberen Teil der Prothese eine Verformung detektiert werden soll und somit zwei unterschiedliche elektrisch leitfähige Materialien mit einem piezoresistiven Verhalten und einem konstanten, verformungsunabhängigen



elektrischen Widerstand benötigt werden. Diese Anforderungen führen zur Auswahl von Protospasta Conductive PLA für den piezoresistiven Teil und Functionalize F-Electric™ PLA für den nicht piezoresistiven Teil, welche infolge des gleichen Matrixpolymers eine generelle Kompatibilität aufweisen. Die Anbindung der beiden Materialien wird als Nut-Feder-Verbindung mit einem Überlappungsbereich von 5 mm ausgeführt. Um die Beanspruchung der Verbindungsstelle zu minimieren, wird diese in den Bereich des oberen starren Teils des Fingers gelegt. Die Höhe des Sensors wird auf 0,6 mm festgesetzt, um die Gelenkversteifung zu begrenzen. Die Kontaktierung des Sensors erfolgt durch eine Klemmung im unteren starren Teil, um hierdurch eine ausreichend hohe Anpresskraft für einen konstanten Kontaktwiderstand zu realisieren. Das Funktionsprinzip des Sensors mit der verformungsabhängigen Widerstandsänderung ( $\approx 160 \Omega$ ) des oberen Gelenks ist in Abbildung 7.26 anhand einer manuellen Deformation gezeigt, da kein Antrieb integriert ist.



**Abbildung 7.26:** Demonstration der Funktionsweise des integrierten piezoresistiven Sensors zum Detektieren einer Verformung des oberen Gelenks

Der geringe Unterschied des elektrischen Widerstands zwischen dem Ausgangszustand und dem bewegten Finger ist wahrscheinlich auf eine Änderung des Anpressdrucks zwischen Sensor und Kontaktierung infolge der Dehnung des Sensors zurückzuführen. Durch die Verwendung von Silberleitpaste oder einer Erhöhung des Anpressdrucks sollte diese Widerstandsänderung jedoch minimiert bzw. vollständig beseitigt werden. Der Vorteil der additiv gefertigten Sensorstruktur in diesem Kontext stellt deren individuelle Anpassbarkeit an die Geometrie der Fingerprothese dar.

Die Integration des Antriebs ist in dem Demonstrator noch nicht umgesetzt. Dieser sollte jedoch im unteren Bereich über einen Servomotor und eine Übersetzung oder einen Seilzugmechanismus integrierbar sein, was in weiteren Versuchen erprobt werden soll. Diese experimentellen Untersuchungen sind jedoch nicht Teil dieser Arbeit. Zudem ist eine genaue Analyse des Ansprechverhaltens des Sensors zu einer abschließenden Beurteilung der anwendungsfallabhängigen Eignung erforderlich (vgl. [Wan19]).

## 7.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel sind zunächst die technische Umsetzbarkeit von zwei Konstruktionsprinzipien für die MMM anhand experimenteller Untersuchungen demonstriert und für ausgewählte Materialien bzw. Materialkombinationen spezifische Kennwerte ermittelt worden. Aus den Versuchen sind zudem Stellhebel und Konstruktionshinweise abgeleitet worden. Basierend auf der definierten Struktur und den Inhalten der Wissensbereitstellung zur Untersetzung der Bauteilkonzeption im Hinblick auf die Nutzung der konstruktiven Potenziale der MMM (Abschnitt 4.2), ist eine prototypische Umsetzung des Systems als Graphendatenbank erfolgt. Die Umsetzung des Wissenssystems umfasst die Einpflege der erhobenen Daten und der identifizierten Konstruktionsprinzipien.

Auf dieser Grundlage ist eine beispielhafte Anwendung des Systems anhand der Neukonzeption einer additiv gefertigten Handprothese erfolgt, wobei die technische Umsetzbarkeit des entwickelten Lösungskonzepts durch eine Fertigung mittels MMM evaluiert worden ist.

Das Ergebnis zeigt, dass eine Berücksichtigung der Potenziale der MMM durch die Wissensbereitstellung innerhalb der Konzeptentwicklung unterstützt wird, sodass eine Erweiterung des betrachteten Lösungsraums im Hinblick auf alternative Konzepte möglich ist. Aufgrund der begrenzten Anzahl der Extruder der verwendeten Fertigungsanlage ist die umgestaltete Fingerprothese jedoch zweiteilig umgesetzt worden. Nichtsdestotrotz konnte gegenüber dem initialen Design der Montageaufwand reduziert werden, sodass das neue Design weniger anfällig gegenüber Fertigungstoleranzen ist. Außerdem sind die Möglichkeiten in der Einstellung der Gelenksteifigkeit erweitert worden und durch die Integration eines piezoresistiven Sensors eine zusätzliche Funktion zur Messung des Zustands in die Fingerprothese integriert worden. Vertiefte Untersuchungen in Bezug auf das Ansprechverhalten der Sensorik sowie das Verhalten der Gelenke unter Dauerbelastung stehen noch aus. Durch die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands des für die Sensorfertigung eingesetzten Materials kann dieser bei oberflächennaher Integration weiterhin zur Realisierung eines Temperatursensors eingesetzt werden (siehe [Lei12; Wan19]).





## 8 SCHLUSSBETRACHTUNGEN UND AUSBLICK

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit den eingangs formulierten Zielsetzungen bzw. Forschungsfragen gegenübergestellt und bewertet. Hierauf aufbauend wird anschließend der Bedarf an zukünftigen Forschungsvorhaben identifiziert.

### 8.1 Zusammenfassung

Das Ergebnis der vorliegenden Arbeit stellt die Entwicklung einer Methode zur systematischen Unterstützung der Bauteilkonzeption unter Berücksichtigung der konstruktiven Freiheiten der Multi-Material-Materialextrusion dar. Zentrale Elemente der Methode bilden die Identifikation und Aufbereitung von Lösungsprinzipien und deren Verknüpfung mit Gestaltungswissen, die Ermittlung spezifischer Kennwerte für ausgewählte Prinzipien sowie eine Entscheidungsunterstützung zur Schichtverbundgestaltung. Nachfolgend werden die Ergebnisse in Bezug auf die Forschungsfragen (Abschnitt 3.2) diskutiert.

#### Forschungsfrage 1

Die Identifikation von konstruktiven Möglichkeiten in Bezug auf MMM und somit die Identifikation von spezifischen Konstruktionsprinzipien wurde anhand unterschiedlicher Vorgehensweisen demonstriert. Durch eine Analyse von Anwendungsbeispielen, der systematischen Kombination von unterschiedlichen Materialeigenschaften und der Durchführung von experimentellen Untersuchungen sind insgesamt 23 Prinzipien für die MMM identifiziert bzw. erarbeitet worden. Zwei dieser Prinzipien sind detailliert aufbereitet worden, indem in experimentellen Untersuchungen die technische Umsetzbarkeit evaluiert sowie Stellhebel und Konstruktionshinweise ermittelt wurden. Hierdurch konnten sowohl die identifizierten Vorgehensweisen zur Ermittlung von Konstruktionsprinzipien erfolgreich angewendet als auch die konstruktiven Freiheiten der MMM aufgezeigt werden. Darüber hinaus wurden durch die detaillierten Untersuchungen die bisherigen Möglichkeiten in Bezug auf mittels MMM hergestellte passive Dämpfungsmaßnahmen und integrierte wärmeabstrahlende Strukturen erweitert.

Der Umfang der in dieser Arbeit identifizierten Prinzipien ist jedoch begrenzt und bedarf zukünftig weiterer Recherchen und experimenteller Untersuchungen. Dies liegt u.a. in den stetigen Weiterentwicklungen in der Material- und Prozesstechnik sowie dem eingeschränkten Betrachtungsraum dieser Arbeit begründet. Außerdem sind detaillierte experimentelle Untersuchungen zu den anderen Prinzipien erforderlich, die in dieser Arbeit nicht fokussiert wurden, um deren Grenzen in der Anwendbarkeit bzw. technischen Umsetzbarkeit zu bewerten und die identifizierten eigenschaftsbezogenen Stellhebel zu quantifizieren. Auf diese Weise ist eine ganzheitliche Bewertung der theoretischen konstruktiven Potenziale der MMM möglich.

#### Forschungsfragen 2 und 3

Auf der Grundlage von allgemeinen Anforderungen an die Bereitstellung von Produkt- und Gestaltungswissen ist ein Ansatz für deren Übertragung auf die MMM entwickelt worden. Die Wissensaufbereitung umfasst neben prinzipbezogenen Informationen bezüglich der Funktionsweise und zu dessen Anwendung auch eine Zuordnung zu konstruktiven Zielstellungen. Hierdurch wird eine generelle Beurteilung der Eignung des Prinzips für den jeweiligen Kontext möglich. Eine Verknüpfung des Prinzips mit spezifischem Wissen über konstruktive Potenziale und Limitierungen unterstützt darüber hinaus die Bewertung der Anwendbarkeit des Prinzips in Bezug auf die

Anforderungen bzw. Randbedingungen. Es konnte gezeigt werden, dass die bereitgestellten Informationen zur Unterstützung des Konzeptionsprozesses eine Mischung aus opportunistischem und restriktivem Wissen sowie aus qualitativen Heuristiken und quantitativen Grenzwerten erfordern. Anhand experimenteller Untersuchungen wurden für ausgewählte Prinzipien material- sowie prozessspezifische Kennwerte in Bezug auf die resultierenden Eigenschaften ermittelt. Aufgrund der zusätzlichen Herausforderung der Schichtverbundgestaltung im Kontext der MMM sind zudem Informationen über die Kompatibilität bzw. Möglichkeiten zur Verbesserung der Verbundhaftung erforderlich. Auf der Basis von Experimenten wurde eine Methode zur Prüfung der Verbundhaftung entwickelt und allgemeine Regeln zur Schichtverbundgestaltung abgeleitet.

Um den Zugang zu den Konstruktionsprinzipien und Wissensinhalten zu erleichtern, wurde ein Ansatz entwickelt, der einen funktionsorientierten Zugriff auf AM-spezifische Lösungsprinzipien ermöglicht. Sowohl die Art der Wissensaufbereitung als auch die Möglichkeiten zur Integration der Wissensbereitstellung in den Konzeptionsprozess wurden in Form von Workshops im akademischen und industriellen Kontext untersucht. In den durchgeführten Workshops hat sich gezeigt, dass durch eine Abstraktion der technischen Problemstellung – im Sinne der allgemeinen Konstruktionsmethodik – die Berücksichtigung der neuen konstruktiven Freiheiten innerhalb des Konzeptionsprozesses gefördert wird. Die Generierung neuartiger Lösungsideen und deren Konkretisierung zu Konzepten konnte durch die Anwendung von Hilfsmitteln wie Prinzipienkarten unterstützt werden. Anhand der Ergebnisse konnte eine generelle Eignung der bereitgestellten Informationen und die Art der Aufbereitung sowie des Vorgehens in Bezug auf eine Berücksichtigung AM-spezifischer Potenziale innerhalb der Entwicklung alternativer Lösungskonzepte festgestellt werden. Zudem wurde durch die Bereitstellung von restriktivem Wissen eine realistische Einschätzung der technischen Umsetzbarkeit der entwickelten Konzepte forciert.

Zur Führung des Produktentwicklers innerhalb der Konzeptentwicklung ist speziell für die Berücksichtigung der Potenziale der MMM prototypisch ein Graphendatenbanksystem umgesetzt worden. Das System verknüpft die Informationen über identifizierte Konstruktionsprinzipien mit den zur Entwicklung von Lösungskonzepten erforderlichen qualitativen und quantitativen Informationen in Bezug auf die Festlegung geometrischer und stofflicher Merkmale. Für ausgewählte Prinzipien sind spezifische Kennwerte erhoben worden, um eine allgemeine Anwendbarkeit der Wissensbereitstellung anhand der Umgestaltung einer Handprothese zu demonstrieren. Die prototypische Fertigung des entwickelten Konzepts hat gezeigt, dass die Wissensbereitstellung die Entwicklung neuer Lösungen gezielt unterstützt, wobei die Betrachtung AM-spezifischer Besonderheiten in der Gestaltung erleichtert wird. Gleichzeitig wird die Berücksichtigung einer generellen technischen Umsetzbarkeit in der Konzeptentwicklung durch prinzipbezogene Konstruktionshinweise und die Betrachtung der Materialkompatibilität gefördert. Dies wird durch die Verknüpfung mit verfügbaren Materialien und prozessabhängigen Kennwerten erreicht.

Da die Anwendbarkeit des Wissenssystems von den eingepflegten Inhalten abhängig ist, wird diese durch den derzeit begrenzten Umfang an aufbereiteten Konstruktionsprinzipien und erhobenen Kennwerten limitiert. Wegen des hohen Aufwands zur Erhebung von quantitativen Kennwerten ist diese lediglich für ausgewählte Prinzipien erfolgt. Jedoch ermöglicht die eigenschaftsbezogene Zuordnung von geometrie- und prozessseitigen Stellhebeln die Bereitstellung qualitativer Informationen für die identifizierten Prinzipien und bildet somit eine Grundlage für die Ermittlung quantitativer Werte und Grenzen. Verbesserungen der Struktur und der bereitgestellten Inhalte des Systems müssen zukünftig infolge einer breiten Anwendung im akademischen und industriellen Kontext identifiziert werden. Außerdem gilt es, den Mehrwert der generierten Lösungskonzepte

für additiv gefertigte Multi-Material-Bauweisen anhand realer Anwendungsfälle zu evaluieren, da das präsentierte Anwendungsbeispiel lediglich eine grundsätzliche Anwendbarkeit der Potenziale der MMM sowie deren technische Umsetzbarkeit aufzeigt.

Aufgrund der Anzahl der durchgeführten Workshops und des begrenzten Teilnehmendenkreises – überwiegend aus der Automobilindustrie sowie Studierende und wissenschaftliche Mitarbeitende – ist eine Verallgemeinerung des Vorgehens und der Wissensbereitstellung auf andere Branchen nicht uneingeschränkt möglich. Eine Überprüfung der innerhalb der Workshops entwickelten Konzepte im Hinblick auf eine technische Umsetzbarkeit und den generierten Mehrwert ist zudem nicht durch prototypische Realisierungen durchgeführt worden. Somit basiert die Beurteilung der Ergebnisse der Workshops auf einer theoretischen Bewertung und einer rudimentären Abschätzung des generierten Mehrwerts. Die Umfrageergebnisse und die entwickelten Konzepte zeigen, dass das Vorwissen und der individuelle Hintergrund (z.B. Berufserfahrung) der Teilnehmenden Auswirkungen auf Bedarfe in Bezug auf die Art und die Inhalte der bereitgestellten Informationen haben. Diese individuellen Bedürfnisse wurden in der Wissensbereitstellung nicht explizit betrachtet.

## 8.2 Ausblick

Auf Basis der aufgeführten Arbeitsergebnisse und der identifizierten Limitierungen ergeben sich Anknüpfungspunkte für weitere Forschungsvorhaben.

### **Erweiterung der Wissensbereitstellung und Identifikation von Anwendungsfällen**

Der Grad der Anwendbarkeit der konstruktiven Potenziale der MMM steigt mit dem verfügbaren Wissen in Bezug auf allgemeine Konstruktionsprinzipien sowie mit den verknüpften Informationen über Gestaltungsmöglichkeiten und -grenzen. Da sich aufgrund von Weiterentwicklungen im Bereich der Fertigungstechnik und der Materialwissenschaften das verfügbare Wissen stetig erweitert, ist eine kontinuierliche Anpassung bzw. Erweiterung der Konstruktionsprinzipien und der verknüpften Informationen an den Stand der Technik bzw. Forschung notwendig. Aktuelle Entwicklungen im Bereich des 4D-Drucks eröffnen – bspw. in Kombination mit leitfähigen, wärmeerzeugenden Materialien – neue Möglichkeiten zur Integration aktiv anpassbarer Bauteilgeometrien, um unterschiedliche zeitlich abhängige Funktionen zu realisieren. Eine systematische Untersuchung potenzieller Anwendungsfälle sowie die Analyse von verfahrenstechnischen und gestalterischen Grenzen ist hierfür bisher noch nicht durchgeführt worden. Zudem zeigen die experimentellen Untersuchungen in dieser Arbeit die großen Gestaltungsfreiheiten der additiven Fertigung in Bezug auf die Integration von lokalen Dämpfungsstrukturen oder wärmeabstrahlenden Funktionsflächen. Zur gezielten Unterstützung des Produktentwicklers über die Konzeption hinaus sind weitere Untersuchungen und die Ableitung von spezifischen Gestaltungsregeln erforderlich, sodass eine vollständige Abdeckung der Aktivitäten innerhalb des PEP erreicht wird. Im Bereich der Schichtverbundgestaltung konnten in dieser Arbeit bereits grundlegende Konstruktionshinweise und Einflussfaktoren ermittelt und exemplarisch die konstruktiven Möglichkeiten hinsichtlich formschlüssiger Verbindungen aufgezeigt werden. Eine umfängliche Analyse und Quantifizierung dieser Gestaltungsmöglichkeiten steht jedoch noch aus, da die kombinierbaren Materialien maßgeblich das Potenzial der MMM bestimmen.

Einen weiteren wichtigen Punkt stellt die Identifikation von Anwendungsfällen für additiv gefertigte MMM im Bereich von Funktionsteilen dar, sodass hieraus systematisch die generierten Mehrwerte analysiert werden können. Eine Verknüpfung mit algorithmusbasierten Entwurfsmethoden,

wie dem Generativen Design, ist zudem zur Unterstützung des Gestaltungsprozesses und der Formfindung sinnvoll, um die konstruktiven Möglichkeiten der additiven Fertigung innerhalb des zur Verfügung stehenden Lösungsraums auszuschöpfen. Darüber hinaus erweitert eine Verkettung verschiedener Fertigungsprozesse, wie bei der Inkrementellen Fertigung [Rei19], die Gestaltungsmöglichkeiten, indem bspw. durch den Einsatz roboterbasierter Systeme neue Freiheiten in der Bahnplanung realisiert werden können.

### **Anwendung und Weiterentwicklung des Wissenssystems**

Das entwickelte System zur Wissensbereitstellung stellt einen Prototyp eines Graphendatenbanksystems dar, welches die generelle Umsetzbarkeit und Verknüpfung der Informationen demonstriert. Zur Verbesserung der Anwendung und einer gezielteren Unterstützung in der Bauteilkonzeption ist einerseits die Implementierung von weiteren Daten erforderlich, andererseits eine Erweiterung des Funktionsumfangs, die eine Filterung der Informationen erlaubt. Weitere Hinweise auf strukturelle sowie inhaltliche Anpassungen sollten zukünftig durch eine breite Anwendung im industriellen Kontext sowie im Bereich der Lehre und Forschung identifiziert werden. Auf dieser Grundlage wäre auch eine fundierte Zuordnung der Prinzipien zu konstruktiven Zielen möglich, indem die Häufigkeit der Anwendung und der generierte Mehrwert evaluiert werden. Weiterhin ist eine Erweiterung der Datenbasis auch um nicht MMM-spezifische AM-Prinzipien (siehe [Kus19; Sch19]) notwendig, um den Anwendungsbereich zu erweitern.

## 9 LISTE EIGENER VERÖFFENTLICHUNGEN

- [Fre19] Freund, R.; Watschke, H.; Heubach, J.; Vietor, T.: Determination of Influencing Factors on Interface Strength of Additively Manufactured Multi-Material Parts by Material Extrusion. In *Applied Sciences*, 2019, 9, S. 1782.
- [Kum16] Kumke, M.; Watschke, H.; Vietor, T.: A new methodological framework for design for additive manufacturing. In *Virtual and Physical Prototyping*, 2016, 11, S. 3–19.
- [Kum17a] Kumke, M.; Watschke, H.; Hartogh, P.; Bavendiek, A.-K.; Vietor, T.: Methods and tools for identifying and leveraging additive manufacturing design potentials. In *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2017, 12, S. 481–493.
- [Kum17b] Kumke, M.; Watschke, H.; Vietor, T.: A new methodological framework for design for additive manufacturing. In (Badiru, A. B.; Valencia, V. V.; Liu, D. Hrsg.): *Additive Manufacturing Handbook*. CRC Press, 2017, S. 187–195.
- [Kus19] Kuschmitz, S.; Watschke, H.; Schumacher, F.; Vietor, T.: Bereitstellung von Lösungsprinzipien für die additive Fertigung zur Unterstützung der Bauteilkonzeption in der industriellen Praxis. In (Kynast, M.; Eichmann, M.; Witt, G. Hrsg.): *Rapid.Tech - International Trade Show et Conference for Additive Manufacturing. Proceedings of the 16th Rapid.Tech Conference Erfurt, Germany, 25–27 June 2019*. Carl Hanser Verlag, München, 2019, S. 75–88.
- [Ric16] Richter, T.; Watschke, H.; Inkermann, D.; Vietor, T.: Produktarchitekturgestaltung unter Berücksichtigung additiver Fertigungsverfahren. In (Stelzer, R. Hrsg.): *Entwerfen Entwickeln Erleben 2016. Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik Dresden, 30. Juni – 1. Juli 2016*. TUDpress, Dresden, 2016, S. 375–390.
- [Ric17] Richter, T.; Schumacher, F.; Watschke, H.; Vietor, T.: Product model-based identification of potentials of additive manufacturing in the design process. In (Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. Hrsg.): *Design for X. Beiträge zum 28. DfX-Symposium, 2017*. Tutech Verlag, TuTech Innovation GmbH, Hamburg, 2017, S. 177–190.
- [Ric18] Richter, T.; Watschke, H.; Schumacher, F.; Vietor, T.: Exploitation of potentials of additive manufacturing in ideation workshops: *Proceedings of The Fifth International Conference on Design Creativity (ICDC2018)*, 2018.
- [Rin18] Ring, T.; Kuschmitz, S.; Watschke, H.; Vietor, T.; Langer, S.C.: Additive Fertigung und Charakterisierung akustisch wirksamer Materialien: *DAGA 2018*, München, 2018.
- [Rot17] Rothe, S.; Watschke, H.; Langer, S.C.: Study on the producibility of additively manufactured acoustic black holes: *Proceedings of ICSV 24*, 2017, S. 3208–3215.
- [Rot18] Rothe, S.; Blech, C.; Watschke, H.; Vietor, T.; Langer, S.C.: Numerical modelling of additively manufactured acoustic black holes: *Proceedings of inter-noise 2018 47th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, 26–29 August, Chicago, USA, 2018*, S. 2137.
- [Rot19] Rothe, S.; Blech, C.; Watschke, H.; Vietor, T.; Langer, S.C.: Layer-effect by additive manufacturing of acoustic black holes: *Proceedings of inter-noise 2019 48th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, 16–19 June 2019, Madrid, Spain, 2019*, S. 1764.

- [Sch19] Schumacher, F.; Watschke, H.; Kuschmitz, S.; Vietor, T.: Goal oriented provision of design principles for additive manufacturing to support conceptual design: Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED 19), Delft, The Netherlands, 5–8 August, 2019, S. 749–758.
- [Tzi15] Tzivanopoulos, T.; Watschke, H.; Krasteva, P.; Vietor, T.: Neue Denkansätze in der Fahrzeugkonzeption. In *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 2015, 117, S. 16–21.
- [Wat16] Watschke, H.; Kumke, M.; Vietor, T.: Design for Additive Manufacturing – Praxisnahe Hilfsmittel zur Identifikation und Nutzung konstruktiver Freiheiten. In (Brökel, K. et al. Hrsg.): 14. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2016. *Traditio et Innovatio - Entwicklung und Konstruktion*, am 6. und 7. Oktober 2016 in Rostock. Shaker Verlag, Aachen, 2016, S. 38–46.
- [Wat17a] Watschke, H.; Rautenberg, D.; Waalkes, L.; Junior, C.S.; Vietor, T.: Integration leitfähiger Funktionen mittels Fused Layer Modeling. In (Kynast, M.; Eichmann, M.; Witt, G. Hrsg.): *Rapid.Tech - International Trade Show et Conference for Additive Manufacturing. Proceedings of the 14th Rapid.Tech Conference Erfurt, Germany*, 20–22 June 2017. Carl Hanser Verlag, München, 2017, S. 419–432.
- [Wat17b] Watschke, H.; Bavendiek, A.-K.; Giannakos, A.; Vietor, T.: A methodical approach to support ideation for additive manufacturing in design education. In (Maier, A. et al. Hrsg.): *DS 87-5 Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17). Vol. 5: Design for X, Design to X*. The Design Society, Glasgow, 2017, S. 41–50.
- [Wat18] Watschke, H.; Waalkes, L.; Schumacher, C.; Vietor, T.: Development of Novel Test Specimens for Characterization of Multi-Material Parts Manufactured by Material Extrusion. In *Applied Sciences*, 2018, 8, S. 1220.
- [Wat19a] Watschke, H.; Hilbig, K.; Vietor, T.: Design and Characterization of Electrically Conductive Structures Additively Manufactured by Material Extrusion. In *Applied Sciences*, 2019, 9, S. 779.
- [Wat19b] Watschke, H.; Gruhn, H.; Fischer, V.; Vietor, T.: Verbesserung der Klebeignung von Polypropylen durch additiv gefertigte Oberflächenstrukturen und Multi-Material-Druck. In (Lachmayer, R.; Lippert, R. B.; Kaierle, S. Hrsg.): *Konstruktion für die Additive Fertigung 2018*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2019.
- [Wat19c] Watschke, H.; Kuschmitz, S.; Heubach, J.; Lehne, G.; Vietor, T.: A Methodical Approach to Support Conceptual Design for Multi-Material Additive Manufacturing: Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED 19), Delft, The Netherlands, 5–8 August, 2019, S. 659–668.

## 10 LITERATURVERZEICHNIS

- [3de15] 3ders.org: Graphene 3D Lab announces commercial sale of conductive graphene filaments for 3D printing. <https://www.3ders.org/articles/20150317-graphene-3d-lab-conductive-graphene-filaments-for-3d-printing.html>, 26.02.2019.
- [3dk19] 3dk.berlin: Technische Daten – 3dkonductive – elektrisch leitfähig. <https://3dk.berlin/de/spezial/169-3dkonductive.html>, 10.04.2019.
- [3dr17] 3druck.com: Forscher verwenden 3D-Druck zur Herstellung von Metamaterialien. <https://3druck.com/forschung/forscher-verwenden-3d-druck-zur-herstellung-von-metamaterialien-1454956/>, 26.02.2019.
- [3dr19] 3druck.com: Materialien für die generative Fertigung. <https://3druck.com/3d-druck-material-liste/>, 20.04.2019.
- [Ada14] Adam, G.A.O. und Zimmer, D.: Design for Additive Manufacturing—Element transitions and aggregated structures. In *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2014, 7, S. 20–28.
- [Ada15] Adam, G.A.O.: Systematische Erarbeitung von Konstruktionsregeln für die additiven Fertigungsverfahren Lasersintern, Laserschmelzen und Fused Deposition Modeling. Shaker, Herzogenrath, 2015.
- [Ahn02] Ahn, S.-H.; Montero, M.; Odell, D.; Roundy, S.; Wright, P.K.: Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. In *Rapid Prototyping Journal*, 2002, 8, S. 248–257.
- [Ahn09] Ahn, D.; Kweon, J.-H.; Kwon, S.; Song, J.; Lee, S.: Representation of surface roughness in fused deposition modeling. In *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209, S. 5593–5600.
- [Alb15] Albers, A.; Bursac, N.; Wintergerst, E.: Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In (Binz, H. et al. Hrsg.): *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, SSP 2015. Entwicklung smarter Produkte für die Zukunft*. Stuttgart Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, 2015.
- [Alt84] Altshuller, G.S.: Creativity as an exact science The theory of the solution of inventive problems. Gordon and Breach, New York, 1984.
- [And15] Andreasen, M.M.; Hansen, C.T.; Cash, P.: *Conceptual design Interpretations, mindset and models*. Springer, Cham, 2015.
- [Ang06] Ang, K.C.; Leong, K.F.; Chua, C.K.; Chandrasekaran, M.: Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in fused deposition modelling-fabricated porous structures. In *Rapid Prototyping Journal*, 2006, 12, S. 100–105.
- [Arm18] Armillotta, A.; Bellotti, M.; Cavallaro, M.: Warpage of FDM parts: Experimental tests and analytic model. In *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, 50, S. 140–152.
- [Ash04] Ashby, M.F.; Bréchet, Y.J.M.; Cebon, D.; Salvo, L.: Selection strategies for materials and processes. In *Materials & Design*, 2004, 25, S. 51–67.
- [Awa09] Awaja, F.; Gilbert, M.; Kelly, G.; Fox, B.; Pigram, P.J.: Adhesion of polymers. In *Progress in Polymer Science*, 2009, 34, S. 948–968.

- [Bad19] Bader, B.; Türck, E.; Vietor, T.: Multi Material Design. A Current Overview of the Used Potential in Automotive Industries. In (Dröder, K.; Vietor, T. Hrsg.): Technologies for economical and functional lightweight design. Conference proceedings 2018. Springer Vieweg, Berlin, Germany, 2019, S. 3–13.
- [Ban18] Bandyopadhyay, A. und Heer, B.: Additive manufacturing of multi-material structures. In Materials Science and Engineering: R: Reports, 2018, 129, S. 1–16.
- [Bau13] Baur, E.; Brinkmann, S.; Osswald, T.A.; Rudolph, N.; Schmachtenberg, E.; Saechtling, H.: Saechtling Kunststoff Taschenbuch. Hanser, München, 2013.
- [Bau16] Bauer, D.; Borchers, K.; Burkert, T.; Ciric, D.; Cooper, F.; Ensthaler, J.; Gaub, H.; Gittel, H.J.; Grimm, T.; Hillebrecht, M.; Kluger, P.J.; Klöden, B.; Kochan, D.; Kolb, T.; Löber, L.; Lenz, J.; Marquardt, E.; Munsch, M.; Müller, A.K.; Müller-Lohmeier, K.; Müller-ter Jung, M.; Schaeflein, F.; Seidel, C.; Schwandt, H.; van de Vrie, R.; Witt, G.; Zäh, M.: Handlungsfelder Additive Fertigungsverfahren. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2016.
- [Bec05] Becker, R.; Grzesiak, A.; Henning, A.: Rethink assembly design. In Assembly Automation, 2005, 25, S. 262–266.
- [Ben19] Benabdellah, A.C.; Bouhaddou, I.; Benghabrit, A.; Benghabrit, O.: A systematic review of design for X techniques from 1980 to 2018: concepts, applications, and perspectives. In The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100, S. 42.
- [Big18a] BigRep GmbH: World-First 3D Printed Airless Bicycle Tire.  
<https://bigrep.com/posts/world-first-3d-printed-airless-bicycle-tire/>, 26.02.2019.
- [Big18b] BigRep GmbH: Neue Dimension für Additive Fertigung.  
<https://bigrep.com/de/posts/neue-dimension-fuer-additive-fertigung/>, 26.02.2019.
- [Ble09] Blessing, L.T.M. und Chakrabarti, A.: DRM, a design research methodology. Springer, London, 2009.
- [Blo17] Blösch-Paidosh, A. und Shea, K.: Design Heuristics for Additive Manufacturing. In (Maier, A. et al. Hrsg.): DS 87-5 Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Conference on Engineering Design (ICED 17). Vol. 5: Design for X, Design to X. The Design Society, Glasgow, 2017, S. 91–100.
- [Blo19] Blösch-Paidosh, A. und Shea, K.: Design Heuristics for Additive Manufacturing Validated Through a User Study. In Journal of Mechanical Design, 2019, 141, S. 041101-1–041101-8.
- [BM12] Bin Maidin, S.; Campbell, I.; Pei, E.: Development of a design feature database to support design for additive manufacturing. In Assembly Automation, 2012, 32, S. 235–244.
- [Bod17] Bodaghi, M.; Damanpack, A.R.; Liao, W.H.: Adaptive metamaterials by functionally graded 4D printing. In Materials & Design, 2017, 135, S. 26–36.
- [Boo11] Boothroyd, G.; Dewhurst, P.; Knight, W.A.: Product design for manufacture and assembly. CRC Press - Taylor & Francis, Boca Raton, 2011.
- [Boo17] Booth, J.W.; Alperovich, J.; Chawla, P.; Ma, J.; Reid, T.N.; Ramani, K.: The Design for Additive Manufacturing Worksheet. In Journal of Mechanical Design, 2017, 139, S. 100904.



- [Bou14] Bourell, D.L.; Rosen, D.W.; Leu, M.C.: The Roadmap for Additive Manufacturing and Its Impact. In *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2014, 1, S. 6–9.
- [Boy14] Boyard, N.; Rivette, M.; Christmann, O.; Richir, S.: A design methodology for parts using Additive Manufacturing. In (Bártolo, P. et al. Hrsg.): *High value manufacturing. Advanced research in virtual and rapid prototyping proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Advanced Research and Rapid Prototyping*, Leiria, Portugal, 1-5 October, 2013. CRC Press/Balkema, Leiden, The Netherlands, 2014, S. 399–404.
- [Bro05] Brockmann, W.: *Klebtechnik Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren*. Wiley-VCH, Weinheim, 2005.
- [Bur15] Burstyn, J.; Fellion, N.; Strohmeier, P.; Vertegaal, R.: PrintPut: Resistive and Capacitive Input Widgets for Interactive 3D Prints. In (Abascal, J. et al. Hrsg.): *Human-Computer Interaction – INTERACT 2015*. Springer International Publishing, Cham, 2015, S. 332–339.
- [Buu90] Buur, J.: *A Theoretical Approach to Mechatronics Design*. PhD Thesis, Lyngby, 1990.
- [Cam12] Campbell, I.; Bourell, D.; Gibson, I.: Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age. In *Rapid Prototyping Journal*, 2012, 18, S. 255–258.
- [Can17] Cantrell, J.; Rohde, S.; Damiani, D.; Gurnani, R.; DiSandro, L.; Anton, J.; Young, A.; Jerez, A.; Steinbach, D.; Kroese, C.; Ifju, P.: Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D Printed ABS and Polycarbonate Parts. In (Yoshida, S.; Lamberti, L.; Sciammarella, C. Hrsg.): *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics, Volume 3*. Springer International Publishing, Cham, 2017, S. 89–105.
- [Car15] Carneiro, O.S.; Silva, A.F.; Gomes, R.: Fused deposition modeling with polypropylene. In *Materials & Design*, 2015, 83, S. 768–776.
- [Cha17] Chacón, J.M.; Caminero, M.A.; García-Plaza, E.; Núñez, P.J.: Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. In *Materials & Design*, 2017, 124, S. 143–157.
- [Cho17] Chong, B.M.P.; Tan, L.B.; Lim, K.M.; Lee, H.P.: A Review on Acoustic Black-Holes (ABH) and the Experimental and Numerical Study of ABH-Featured 3D Printed Beams. In *International Journal of Applied Mechanics*, 2017, 09, S. 1750078.
- [Chr17] Christ, J.F.; Aliheidari, N.; Ameli, A.; Pötschke, P.: 3D printed highly elastic strain sensors of multiwalled carbon nanotube/thermoplastic polyurethane nanocomposites. In *Materials & Design*, 2017, 131, S. 394–401.
- [Col17] ColorFabb: Flexible pliers. <https://www.thingiverse.com/thing:2115131>, 26.02.2019.
- [Col19a] ColorFabb: Technische Daten – XT-Schwarz. <https://colorfabb.com/xt-schwarz>, 31.03.2019.
- [Col19b] ColorFabb: Technische Daten – XT-CF20. <https://colorfabb.com/xt-cf20>, 31.03.2019.

- [Cue18] Cuellar, J.S.; Smit, G.; Zadpoor, A.A.; Breedveld, P.: Ten guidelines for the design of non-assembly mechanisms: The case of 3D-printed prosthetic hands. In Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part H, Journal of engineering in medicine, 2018, 232, S. 962–971.
- [Deg18] Degirmenci, E.; Heubach, J.; Müller, P.; Kronsbein, P.; Wu, Z.: Bericht zur Laborveranstaltung Rechnerunterstütztes Konstruieren für Additive Fertigung im Sommersemester 2018, 2018.
- [DEL19] DELO: Technische Informationen DELO®-PUR 9694, 09.18 (Revision 74). [https://www.delo.de/fileadmin/datasheet/DELO-PUR\\_9694\\_%28TIDB-D%29.pdf](https://www.delo.de/fileadmin/datasheet/DELO-PUR_9694_%28TIDB-D%29.pdf), 31.03.2019.
- [DIN00] Deutsches Institut für Normung e. V.: Prüfen von Schweißverbindungen aus thermoplastischen Kunststoffen - Teil 2: Zugversuch (DIN EN 12814-2). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2000.
- [DIN03] Deutsches Institut für Normung e. V.: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe (DIN 8593-0). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003.
- [DIN06a] Deutsches Institut für Normung e. V.: Klebstoffe - Bestimmung der Scherfestigkeit von Klebungen zwischen starren Werkstoffen nach dem Blockscherverfahren (DIN EN ISO 13445). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2006.
- [DIN09a] Deutsches Institut für Normung e. V.: Klebstoffe - Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebeungen (DIN EN 1465). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009.
- [DIN09b] Deutsches Institut für Normung e. V.: Klebstoffe - Bestimmung der Zugfestigkeit von Stumpfklebeungen (DIN EN 15870). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009.
- [DIN10] Deutsches Institut für Normung e. V.: Klebstoffe - Bestimmung des Schälwiderstandes von Klebungen - Rollenschälversuch (DIN EN 1464). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010.
- [DIN11] Deutsches Institut für Normung e. V.: Strukturklebstoffe - Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen - Teil 2: Scherprüfung für dicke Fügeteile (DIN EN 14869-2). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011.
- [DIN16a] Deutsches Institut für Normung e. V.: Additive Fertigung – Grundlagen – Teil 2: Überblick über Prozesskategorien und Ausgangswerkstoffe (DIN EN ISO 17296-2). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016.
- [DIN16b] Deutsches Institut für Normung e. V.: Additive Fertigung – Grundlagen – Teil 3: Haupteigenschaften und entsprechende Prüfverfahren (DIN EN ISO 17296-3). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016.
- [DIN17a] Deutsches Institut für Normung e. V.: Additive Fertigung - Technische Konstruktionsrichtlinie für Pulverbettfusion - Teil 1: Laserbasierte Pulverbettfusion von Metallen (DIN EN ISO / ASTM 52911-1, Entwurf). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2017.
- [DIN17b] Deutsches Institut für Normung e. V.: Additive Fertigung - Technische Konstruktionsrichtlinie für Pulverbettfusion - Teil 2: Laserbasierte Pulverbettfusion von Polymeren (DIN EN ISO / ASTM 52911-2, Entwurf). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2017.

- [DIN17c] Deutsches Institut für Normung e. V.: Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften (DIN EN ISO 178). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2017.
- [DIN18a] Deutsches Institut für Normung e. V.: Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie (DIN EN ISO/ ASTM 52900, Entwurf). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2018.
- [DIN18b] Deutsches Institut für Normung e. V.: Additive Fertigung – Grundlagen – Anforderungen an erworbene additiv gefertigte Bauteile (DIN EN ISO / ASTM 52901, Entwurf). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2018.
- [DIN18c] Deutsches Institut für Normung e. V.: Additive Fertigung – Testkörper – Allgemeine Leitlinie für die Bewertung der geometrischen Leistung additiver Fertigungssysteme (AM-Systeme) (DIN EN ISO / ASTM 52902, Entwurf). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2018.
- [Dou12] Doubrovski, E.L.; Verlinden, J.C.; Horvath, I.: First Steps Towards Collaboratively Edited Design for Additive Manufacturing Knowledge: Proceedings of the 23th Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF 2012), 2012, S. 891–901.
- [DP19] Du Plessis, A.; Broeckhoven, C.; Yadroitsava, I.; Yadroitsev, I.; Hands, C.H.; Kunju, R.; Bhate, D.: Beautiful and Functional: A Review of Biomimetic Design in Additive Manufacturing. In *Additive Manufacturing*, 2019, 27, S. 408–427.
- [Dul18] Dul, S.; Fambri, L.; Pegoretti, A.: Filaments Production and Fused Deposition Modelling of ABS/Carbon Nanotubes Composites. In *Nanomaterials* (Basel, Switzerland), 2018, 8.
- [Dur14] Durgun, I. und Ertan, R.: Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost. In *Rapid Prototyping Journal*, 2014, 20, S. 228–235.
- [Ecc19] Ecco, L.; Dul, S.; Schmitz, D.; Barra, G.; Soares, B.; Fambri, L.; Pegoretti, A.: Rapid Prototyping of Efficient Electromagnetic Interference Shielding Polymer Composites via Fused Deposition Modeling. In *Applied Sciences*, 2019, 9, S. 37.
- [Ehr11] Ehrenstein, G.W.: *Polymer-Werkstoffe Struktur - Eigenschaften - Anwendung*. Hanser, München, 2011.
- [Ehr13] Ehrlenspiel, K. und Meerkamm, H.: *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. Hanser, München, 2013.
- [Ehr14] Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.; Mörtl, M.: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [Ehr85] Ehrlenspiel, K.: *Kostengünstig Konstruieren: Kostenwissen, Kosteneinflüsse, Kostensenkung*. Springer, Berlin, 1985.
- [Ele19] Electron Microscopy Sciences: Technische Daten – Silver Paste EMS #12640. <https://www.emsdiasum.com/microscopy/technical/datasheet/12640.aspx>, 04.01.2019.
- [Els09] Elsner, P.C.: *3D-Drucktechnologie – Grundlagen zur Herstellung polymerer Bauteile mit gradierten Werkstoffeigenschaften*. Dissertation, Berlin, TU Berlin, 2009.
- [Emm11a] Emmelmann, C.; Sander, P.; Kranz, J.; Wycisk, E.: Laser Additive Manufacturing and Bionics: Redefining Lightweight Design. In *Physics Procedia*, 2011, 12, S. 364–368.

- [Emm11b] Emmelmann, C.; Petersen, M.; Kranz, J.; Wycisk, E.: Bionic lightweight design by laser additive manufacturing (LAM) for aircraft industry. In (Ambs, P. et al. Hrsg.): SPIE Eco-Photonics 2011: Sustainable Design, Manufacturing, and Engineering Workforce Education for a Green Future. SPIE, 2011, 80650L.
- [Ena19a] Enabling the Future: Build a Hand. <http://enablingthefuture.org/upper-limb-prosthetics/>, 05.05.2019.
- [Ena19b] Enabling the Future: About Us. <http://enablingthefuture.org/about/>.
- [Esp14] Espalin, D.; Ramirez, J.A.; Medina, F.; Wicker, R.: Multi-material, multi-technology FDM: exploring build process variations. In *Rapid Prototyping Journal*, 2014, 20, S. 236–244.
- [Fan18] Fang, G.; Matte, C.-D.; Kwok, T.-H.; Wang, C.C.L.: Geometry-based Direct Simulation for Multi-Material Soft Robots. In (Lynch, K. Hrsg.): 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 21-25 May 2018. IEEE, Piscataway, NJ, 2018, S. 1–6.
- [Fel13] Feldhusen, J. und Grote, K.-H.: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [Fer16] Fernandez-Vicente, M.; Calle, W.; Ferrandiz, S.; Conejero, A.: Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing. In *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2016, 3, S. 183–192.
- [Fis18] Fischer, A.; Gebauer, S.; Khavkin, E.: *3D-Druck für Unternehmen Entscheidungsmodelle, Best Practices und Anwendungsbeispiele. Am Beispiel Fused Layer Modeling (FLM)*. Carl Hanser Verlag, München, 2018.
- [For15] Forster, A.M.: Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer Materials: State of the Art and Standards Applicability. In (National Institute of Standards and Technology Hrsg.): *National Institute of Standards and Technology Interagency Report (NISTIR) 8059*, 2015.
- [Fra76] Franke, H.-J.: *Untersuchungen zur Algorithmisierbarkeit des Konstruktionsprozesses*. Dissertation. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1976.
- [Fre19] Freund, R.; Watschke, H.; Heubach, J.; Vietor, T.: Determination of Influencing Factors on Interface Strength of Additively Manufactured Multi-Material Parts by Material Extrusion. In *Applied Sciences*, 2019, 9, 1782.
- [Fu15] Fu, K.K.; Yang, M.C.; Wood, K.L.: Design Principles: The Foundation of Design: Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference - 2015. The American Society of Mechanical Engineers, New York, N.Y., 2015, V007T06A034.
- [Fu16] Fu, K.K.; Yang, M.C.; Wood, K.L.: Design Principles: Literature Review, Analysis, and Future Directions. In *Journal of Mechanical Design*, 2016, 138, S. 101103.
- [Fun19] Functionalize: Technische Daten – Functionalize F-Electric™ PLA. <http://functionalize.com/about/functionalize-f-electric-highly-conductive-filament/>, 04.01.2019.

- [Gao15] Gao, W.; Zhang, Y.; Ramanujan, D.; Ramani, K.; Chen, Y.; Williams, C.B.; Wang, C.C.L.; Shin, Y.C.; Zhang, S.; Zavattieri, P.D.: The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. In *Computer-Aided Design*, 2015, 69, S. 65–89.
- [Geb13] Gebhardt, A.: *Generative Fertigungsverfahren Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*. Carl Hanser Verlag, München, 2013.
- [Geb14] Gebhardt, A.: *3D-Drucken Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM)*. Carl Hanser Verlag, München, 2014.
- [Geb16] Gebhardt, A.: *Additive Fertigungsverfahren Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion*. Carl Hanser Verlag, München, 2016.
- [Gib15] Gibson, I.; Rosen, D.W.; Stucker, B.: *Additive manufacturing technologies 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. Springer Verlag, New York, 2015.
- [Gla15] Glasschroeder, J.; Prager, E.; Zaeh, M.F.: Powder-bed-based 3D-printing of function integrated parts. In *Rapid Prototyping Journal*, 2015, 21, S. 207–215.
- [Gna17] Gnanasekaran, K.; Heijmans, T.; van Bennekom, S.; Woldhuis, H.; Wijnia, S.; de With, G.; Friedrich, H.: 3D printing of CNT- and graphene-based conductive polymer nanocomposites by fused deposition modeling. In *Applied Materials Today*, 2017, 9, S. 21–28.
- [Goe89] Goel, V. und Pirollo, P.: Motivation the Notion of Generic Design within Information-Processing Theory: The Design Problem Space. In *AI Magazine*, 1989, 10, S. 19–36.
- [Gra13] Graner, M.: *Der Einsatz von Methoden in Produktentwicklungsprojekten*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2013.
- [Gro09] Grotkamp, S.: *Bewertung von Produktstrukturkonzepten im Variantenmanagement*. Dr. Hut Verlag, München, 2009.
- [Hab09] Habenicht, G.: *Kleben*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [Ham17] Hampel, B.; Monshausen, S.; Schilling, M.: Properties and applications of electrically conductive thermoplastics for additive manufacturing of sensors. In *tm - Technisches Messen*, 2017, 84, S. 593–599.
- [Hat03] Hatchuel, A. und Weil, B.: A new Approach of Innovative Design: An Introduction to C-K Theory. In (Folkesson, A. Hrsg.): *DS 31: Proceedings of ICED 03*. Design Society, Glasgow, 2003, DS31\_1794FPC.
- [Hoc08] Hochschule Bremen: *Design Guidelines for Rapid Prototyping Konstruktionsrichtlinie für ein fertigungsgerechtes Gestalten anhand des Fused Deposition Modeling mit Dimension SST 768*.
- [igu19] igus® GmbH: *3D-Druck-Filamente für maximale Lebensdauer*. <https://www.igus.de/3d-print-material/3d-druck-filament>, 20.04.2019.
- [Ink16] Inkermann, D.: *Anwendung adaptronischer Lösungsprinzipien für die Entwicklung adaptiver Systeme*. Dr. Hut Verlag, München, 2016.

- [Ink17] Inkermann, D.; Kleemann, S.; Vietor, T.: Ein Potentialmodell für die Nutzung neuer Technologien in der Produktentwicklung. In (Binz, H. et al. Hrsg.): Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2017. Stuttgart Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, 2017.
- [Inn19] Innofil3D BV: Technisches Datenblatt – ABS by Innofil3D BV, Version No.: 2.0. <https://www.innofil3d.com/wp-content/uploads/2016/05/TDS-Innofil3D-ABS-160609.pdf>, 31.03.2019.
- [Ion16] Ion, A.; Frohnhofen, J.; Wall, L.; Kovacs, R.; Alistar, M.; Lindsay, J.; Lopes, P.; Chen, H.-T.; Baudisch, P.: Metamaterial Mechanisms: Proceedings of UIST'16, 2016.
- [ISO19] International Organization for Standardization: ISO/TC 261: Additive manufacturing. <https://www.iso.org/committee/629086.html>, 30.03.2019.
- [Jan91] Jansson, D.G. und Smith, S.M.: Design fixation. In Design Studies, 1991, 12, S. 3–11.
- [Jay19] Jayanth, N. und Senthil, P.: Application of 3D printed ABS based conductive carbon black composite sensor in void fraction measurement. In Composites Part B: Engineering, 2019, 159, S. 224–230.
- [Jes97] Jeschke, A.: Beitrag zur wirtschaftlichen Bewertung von Standardisierungsmaßnahmen in der Einzel- und Kleinserienfertigung durch die Konstruktion. Dissertation, Braunschweig, 1997.
- [Kam17] Kamps, T.; Gralow, M.; Schlick, G.; Reinhart, G.: Systematic Biomimetic Part Design for Additive Manufacturing. In Procedia CIRP, 2017, 65, S. 259–266.
- [Kim17] Kim, K.; Park, J.; Suh, J.-h.; Kim, M.; Jeong, Y.; Park, I.: 3D printing of multiaxial force sensors using carbon nanotube (CNT)/thermoplastic polyurethane (TPU) filaments. In Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 263, S. 493–500.
- [Kim18] Kim, S.; Rosen, D.W.; Witherell, P.; Ko, H.: Linking Part Design To Process Planning By Design For Additive Manufacturing Ontology: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2018). Nanyang Technological University, Singapore, 2018, S. 303–308.
- [Kir11] Kirchner, K.: Entwicklung eines Informationssystems für den effizienten Einsatz generativer Fertigungsverfahren im Produktentwicklungsprozess. Verlag Dr. Hut, München, 2011.
- [Kla15] Klahn, C.; Leutenecker, B.; Meboldt, M.: Design Strategies for the Process of Additive Manufacturing. In Procedia CIRP, 2015, 36, S. 230–235.
- [Kle16] Kleemann, S.; Türck, E.; Vietor, T.: Towards Knowledge Based Engineering for Multi-Material-Design: DS 84: Proceedings of the DESIGN 2016 14<sup>th</sup> International Design Conference, 2016, S. 2027–2036.
- [Kle17a] Kleemann, S.; Inkermann, D.; Bader, B.; Türck, E.; Vietor, T.: A Semi-Formal Approach to Structure and Access Knowledge for Multi-Material-Design. In (Maier, A. et al. Hrsg.): DS 87-1 Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Conference on Engineering Design (ICED 17). Vol. 1: Resource-Sensitive Design, Design Research Applications and Case Studies. The Design Society, Glasgow, 2017, S. 289–298.

- [Kle17b] Kleemann, S.; Fröhlich, T.; Türck, E.; Vietor, T.: A Methodological Approach Towards Multi-material Design of Automotive Components. In *Procedia CIRP*, 2017, 60, S. 68–73.
- [Klo16] Kloke, A.: *Untersuchung der Werkstoff-, Prozess- und Bauteileigenschaften beim Fused Deposition Modeling Verfahren*. Shaker Verlag, Aachen, 2016.
- [Kol94] Koller, R.: *Konstruktionslehre für den Maschinenbau*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1994.
- [Kum16] Kumke, M.; Watschke, H.; Vietor, T.: A new methodological framework for design for additive manufacturing. In *Virtual and Physical Prototyping*, 2016, 11, S. 3–19.
- [Kum17a] Kumke, M.; Watschke, H.; Hartogh, P.; Bavendiek, A.-K.; Vietor, T.: Methods and tools for identifying and leveraging additive manufacturing design potentials. In *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2017, 12, S. 481–493.
- [Kum18] Kumke, M.: *Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2018.
- [Kus19] Kuschmitz, S.; Watschke, H.; Schumacher, F.; Vietor, T.: Bereitstellung von Lösungsprinzipien für die additive Fertigung zur Unterstützung der Bauteilkonzeption in der industriellen Praxis. In (Kynast, M.; Eichmann, M.; Witt, G. Hrsg.): *Rapid.Tech - International Trade Show et Conference for Additive Manufacturing. Proceedings of the 16th Rapid.Tech Conference Erfurt, Germany, 25–27 June 2019*. Carl Hanser Verlag, München, 2019, S. 75–88.
- [Kwo17] Kwok, S. W.; Goh, K.H.H.; Tan, Z.D.; Tan, S.T.M.; Tjiu, W.W.; Soh, J.Y.; Ng, Z.J.G.; Chan, Y.Z.; Hui, H.K.; Goh, K.E.J.: Electrically conductive filament for 3D-printed circuits and sensors. In *Applied Materials Today*, 2017, 9, S. 167–175.
- [Lau15] Laumer, T.; Stichel, T.; Amend, P.; Schmidt, M.: Simultaneous laser beam melting of multimaterial polymer parts. In *Journal of Laser Applications*, 2015, 27, S29204.
- [Lav15] Laverne, F.; Segonds, F.; Anwer, N.; Le Coq, M.: Assembly Based Methods to Support Product Innovation in Design for Additive Manufacturing: An Exploratory Case Study. In *Journal of Mechanical Design*, 2015, 137, 121701-1–8.
- [Lav17] Laverne, F.; Segonds, F.; D’Antonio, G.; Le Coq, M.: Enriching design with X through tailored additive manufacturing knowledge: a methodological proposal. In *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2017, 11, S. 279–288.
- [Lee07] Lee, C.S.; Kim, S.G.; Kim, H.J.; Ahn, S.H.: Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts. In *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 187-188, S. 627–630.
- [Lei12] Leigh, S.J.; Bradley, R.J.; Purssell, C.P.; Billson, D.R.; Hutchins, D.A.: A simple, low-cost conductive composite material for 3D printing of electronic sensors. In *PloS one*, 2012, 7, e49365.
- [Li17] Li, X.; Shang, J.; Wang, Z.: Intelligent materials: a review of applications in 4D printing. In *Assembly Automation*, 2017, 37, S. 170–185.

- [Lin09] Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [Lin16] Lindemann, U.: Handbuch Produktentwicklung. Carl Hanser Verlag, München, 2016.
- [Liu17] Liu, X.; Zhang, M.; Li, S.; Si, L.; Peng, J.; Hu, Y.: Mechanical property parametric appraisal of fused deposition modeling parts based on the gray Taguchi method. In *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 89, S. 2387–2397.
- [Liu18] Liu, C.; Huang, N.; Xu, F.; Tong, J.; Chen, Z.; Gui, X.; Fu, Y.; Lao, C.: 3D Printing Technologies for Flexible Tactile Sensors toward Wearable Electronics and Electronic Skin. In *Polymers*, 2018, 10, S. 629.
- [Mir88] Mironov, M.A.: Propagation of a flexural wave in a plate whose thickness decreases smoothly to zero in a finite interval. In *Soviet Physics–Acoustics*, 1988, 34.
- [Moe10] Möser, M.: Messtechnik der Akustik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [Mog12] Mognol, P.; Muller, P.; Hascoet, J.: A novel approach to produce Functionally Graded Materials for additive manufacturing. In (Bártolo, P. J.; Soares de Lemos, A. C. Hrsg.): *Innovative developments in virtual and physical prototyping. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Advanced Research and Rapid Prototyping*, Leiria, Portugal, 28 September - 1 October, 2011. CRC Press/Balkema, Boca Raton, Fla., 2012, S. 473–478.
- [Moh15] Mohamed, O.A.; Masood, S.H.; Bhowmik, J.L.: Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. In *Advances in Manufacturing*, 2015, 3, S. 42–53.
- [Moh17] Mohan, N.; Senthil, P.; Vinodh, S.; Jayanth, N.: A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process. In *Virtual and Physical Prototyping*, 2017, 12, S. 47–59.
- [Mon15] Monzón, M.D.; Ortega, Z.; Martínez, A.; Ortega, F.: Standardization in additive manufacturing: activities carried out by international organizations and projects. In *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 76, S. 1111–1121.
- [Mon17] Monzón, M.D.; Paz, R.; Pei, E.; Ortega, F.; Suárez, L.A.; Ortega, Z.; Alemán, M.E.; Plucinski, T.; Clow, N.: 4D printing: processability and measurement of recovery force in shape memory polymers. In *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 89, S. 1827–1836.
- [Mos17] MosaicManufacturing: Multi-body Carbon Fiber Reinforced Gear. <https://www.thingiverse.com/thing:2202158>, 26.02.2019.
- [Mul18] Multi3D, L.L.C.: Print Electronics with Your FDM 3D Printer. <https://www.multi3dllc.com/>, 26.02.2019.
- [Mul19] Multi3D, L.L.C.: Technische Daten – Electrifi Conductive Filament. <https://www.multi3dllc.com/product/electrifi/>, 04.01.2019.



- [Nam19] Nam, S. und Pei, E.: A taxonomy of shape-changing behavior for 4D printed parts using shape-memory polymers. In *Progress in Additive Manufacturing*, 2019, 10, S. 2733.
- [Nat19] NatureWorks: Technisches Datenblatt – NatureWorks Ingeo™ Biopolymer 4043D. [https://www.natureworkslc.com/~media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet\\_4043D\\_films\\_pdf.pdf](https://www.natureworkslc.com/~media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet_4043D_films_pdf.pdf), 31.03.2019.
- [Ngo18] Ngo, T.D.; Kashani, A.; Imbalzano, G.; Nguyen, K.T.Q.; Hui, D.: Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. In *Composites Part B: Engineering*, 2018, 143, S. 172–196.
- [Nin19] NinjaTek: Technisches Datenblatt – NinjaFlex® 85A by NinjaTek. <https://ninjatek.fppsites.com/wp-content/uploads/2018/10/NinjaFlex-TDS.pdf>, 31.03.2019.
- [Noe04] Noeske, M.; Degenhardt, J.; Strudthoff, S.; Lommatzsch, U.: Plasma jet treatment of five polymers at atmospheric pressure: surface modifications and the relevance for adhesion. In *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2004, 24, S. 171–177.
- [Obe19] Oberhofer, F.; Hein, A.; Holder, D.; Maier, T.: Approach to a Design Guideline Regarding the Interaction of Shape Memory Alloys and Fused Deposition Modeling. In (Karwowski, W.; Ahram, T. Hrsg.): *Intelligent Human Systems Integration 2019*. Springer International Publishing, Cham, 2019, S. 621–627.
- [Ott14] Ottnad, T.A.: Dosierung von Kunststoffen für generative Fertigungsverfahren. Dissertation, München, 2014.
- [Pah07] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: *Konstruktionslehre Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung: Methoden und Anwendung*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [Per18] Perez, K.B.: Design Innovation with Additive Manufacturing (AM) An AM-centric Design Innovation Process. PhD Thesis, Singapore, 2018.
- [Per19] Perez, K.B.; Hilburn, S.; Jensen, D.; Wood, K.L.: Design principle-based stimuli for improving creativity during ideation. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2019, 233, S. 493–503.
- [Pet18] Petersdorff-Campen, K. von; Hauswirth, Y.; Carpenter, J.; Hagmann, A.; Boës, S.; Schmid Daners, M.; Penner, D.; Meboldt, M.: 3D Printing of Functional Assemblies with Integrated Polymer-Bonded Magnets Demonstrated with a Prototype of a Rotary Blood Pump. In *Applied Sciences*, 2018, 8, S. 1275.
- [Pon11] Ponn, J. und Lindemann, U.: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [Pop18] Popescu, D.; Zapciu, A.; Amza, C.; Baci, F.; Marinescu, R.: FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. In *Polymer Testing*, 2018, 69, S. 157–166.
- [Pra18a] Pradel, P.; Zhu, Z.; Bibb, R.; Moultrie, J.: Investigation of design for additive manufacturing in professional design practice. In *Journal of Engineering Design*, 2018, 29, S. 165–200.

- [Pra18b] Pradel, P.; Zhu, Z.; Bibb, R.; Moultrie, J.: A framework for mapping design for additive manufacturing knowledge for industrial and product design. In *Journal of Engineering Design*, 2018, 29, S. 291–326.
- [Pro12] Probst, G.; Raub, S.; Romhardt, K.: *Wissen managen*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2012.
- [Pro19] Proto Pasta: Technische Daten – Proto-pasta Conductive PLA. <https://www.proto-pasta.com/pages/conductive-pla>, 10.04.2019.
- [Pru17] Prüß, H.: *Gestaltung und generative Fertigung von Faser-Kunststoff-Verbunden*. Dr. Hut Verlag, München, 2017.
- [Rei19] Reichler, A.-K.; Gerbers, R.; Falkenberg, P.; Türk, E.; Dietrich, F.; Vietor, T.; Dröder, K.: Incremental Manufacturing: Model-based part design and process planning for Hybrid Manufacturing of multi-material parts. In *Procedia CIRP*, 2019, 79, S. 107–112.
- [Rey18] Reyes, C.; Somogyi, R.; Niu, S.; Cruz, M.A.; Yang, F.; Catenacci, M.J.; Rhodes, C.P.; Wiley, B.J.: Three-Dimensional Printing of a Complete Lithium Ion Battery with Fused Filament Fabrication. In *ACS Applied Energy Materials*, 2018.
- [Ria16] Rias, A.-L.; Bouchard, C.; Segonds, F.; Abed, S.: Design for Additive Manufacturing: A Creative Approach: DS 84: Proceedings of the DESIGN 2016 14<sup>th</sup> International Design Conference, 2016, S. 411–420.
- [Ric16] Richter, T.; Watschke, H.; Inkermann, D.; Vietor, T.: Produktarchitekturgestaltung unter Berücksichtigung additiver Fertigungsverfahren. In (Stelzer, R. Hrsg.): *Entwerfen Entwickeln Erleben 2016. Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik: Dresden, 30. Juni – 1. Juli 2016*. TUDpress, Dresden, 2016, S. 375–390.
- [Ric17] Richter, T.; Schumacher, F.; Watschke, H.; Vietor, T.: Product model-based identification of potentials of additive manufacturing in the design process. In (Krause, D.; Paetzold, K.; Wartack, S. Hrsg.): *Design for X. Beiträge zum 28. DfX-Symposium, 2017*. Tutech Verlag, TuTech Innovation GmbH, Hamburg, 2017, S. 177–190.
- [Ric18] Richter, T.; Watschke, H.; Schumacher, F.; Vietor, T.: Exploitation of potentials of additive manufacturing in ideation workshops: Proceedings of The Fifth International Conference on Design Creativity (ICDC2018), 2018.
- [Rie12] Rieg, F. und Steinhilper, R.: *Handbuch Konstruktion*. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2012.
- [Rie18] Rieg, F.; Steinhilper, R.: *Handbuch Konstruktion*. Hanser, München, 2018.
- [Roo15] Roos, E. und Maile, K.: *Werkstoffkunde für Ingenieure Grundlagen, Anwendung, Prüfung*. Springer Vieweg, Berlin, 2015.
- [Ros07] Rosen, D.W.: Design for Additive Manufacturing A Method to Explore Unexplored Regions of the Design Space: Proceedings of the 18<sup>th</sup> Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF 2007), 2007, S. 402–415.
- [Ros14] Rosen, D.W.: Research supporting principles for design for additive manufacturing. In *Virtual and Physical Prototyping*, 2014, 9, S. 225–232.
- [Rot00] Roth, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen Band 1: Konstruktionslehre*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2000.

- [Rot01] Roth, K.: Konstruieren Mit Konstruktionskatalogen Band 2: Konstruktionskataloge. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2001.
- [Rot17] Rothe, S.; Watschke, H.; Langer, S.C.: Study on the producibility of additively manufactured acoustic black holes: Proceedings of ICSV 24, 2017, S. 3208–3215.
- [Rot18] Rothe, S.; Blech, C.; Watschke, H.; Vietor, T.; Langer, S.C.: Numerical modelling of additively manufactured acoustic black holes: Proceedings of inter-noise 2018 47<sup>th</sup> International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, 2018, S. 2137.
- [Rot19] Rothe, S.; Blech, C.; Watschke, H.; Vietor, T.; Langer, S.C.: Layer-effect by additive manufacturing of acoustic black holes: Proceedings of inter-noise 2019 48<sup>th</sup> International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, 16–19 June 2019, Madrid, Spain, 2019, S. 1764.
- [Rot94] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1994.
- [Sau18] Saunders, S.: Earwig Wings Inspire Researchers to 3D Print Multimaterial, Self-Folding Origami Elements. <https://3dprint.com/207718/self-folding-origami-earwig-wings/>, 26.02.2019.
- [Sch09] Schuck, M.: Kompatibilitätsprinzipien beim Montagespritzgießen Technisch-wissenschaftlicher Bericht. Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Univ, Erlangen, 2009.
- [Sch12] Schmit, J.: human left hand. <https://grabcad.com/library/human-left-hand>, 05.05.2019.
- [Sch16] Schmidt, T.: Potentialbewertung generativer Fertigungsverfahren für Leichtbauteile. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [Sch19] Schumacher, F.; Watschke, H.; Kuschmitz, S.; Vietor, T.: Goal oriented provision of design principles for additive manufacturing to support conceptual design: Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Conference on Engineering Design (ICED 19), Delft, The Netherlands, 5–8 August, 2019, S. 749–758.
- [See14] Seepersad, C.C.: Challenges and Opportunities in Design for Additive Manufacturing. In 3D Printing and Additive Manufacturing, 2014, 1, S. 10–13.
- [See17] Seepersad, C.C.; Allison, J.; Sharpe, C.: The Need for Effective Design Guides in Additive Manufacturing. In (Maier, A. et al. Hrsg.): DS 87-5 Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Conference on Engineering Design (ICED 17). Vol. 5: Design for X, Design to X. The Design Society, Glasgow, 2017, S. 309–316.
- [Sim19] simplify3d.com: Ultimate 3D Printing Materials Guide. <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/>, 20.04.2019.
- [Sin19] Singh, R.; Kumar, R.; Farina, I.; Colangelo, F.; Feo, L.; Fraternali, F.: Multi-Material Additive Manufacturing of Sustainable Innovative Materials and Structures. In Polymers, 2019, 11, S. 62.
- [Soo10] Sood, A.K.; Ohdar, R.K.; Mahapatra, S.S.: Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. In Materials & Design, 2010, 31, S. 287–295.
- [Soo12] Sood, A.K.; Ohdar, R.K.; Mahapatra, S.S.: Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement. In Journal of Advanced Research, 2012, 3, S. 81–90.

- [Spo17] Spoerk, M.; Arbeiter, F.; Cajner, H.; Sapkota, J.; Holzer, C.: Parametric optimization of intra- and inter-layer strengths in parts produced by extrusion-based additive manufacturing of poly(lactic acid). In *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, 134, S. 45401.
- [Sti16] Stichel, T.; Laumer, T.; Amend, P.; Roth, S.: Multi-material deposition of polymer powders with vibrating nozzles inside laser beam melting machines: Proceedings of 6<sup>th</sup> International Conference on Additive Technologies, 2016, S. 337–341.
- [Sto99] Stone, R.B. und Wood, K.L.: Development of a Functional Basis for Design: Proceedings of DETC99, 1999.
- [Sun08] Sun, Q.; Rizvi, G.M.; Bellehumeur, C.T.; Gu, P.: Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. In *Rapid Prototyping Journal*, 2008, 14, S. 72–80.
- [Tam19] Tamburrino, F.; Graziosi, S.; Bordegoni, M.: The influence of slicing parameters on the multi-material adhesion mechanisms of FDM printed parts: an exploratory study. In *Virtual and Physical Prototyping*, 2019, 4, S. 1–17.
- [Tan16] Tang, Y. und Zhao, Y.F.: A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance. In *Rapid Prototyping Journal*, 2016, 22, S. 569–590.
- [Tan18] Tan, J.C. und Low, H.Y.: Embedded electrical tracks in 3D printed objects by fused filament fabrication of highly conductive composites. In *Additive Manufacturing*, 2018, 23, S. 294–302.
- [Tau12] Taubert, P.: Continuously-variable material properties in RepRap 3D printing. Master Thesis, Bath, 2012.
- [Tek14] Tekinalp, H.L.; Kunc, V.; Velez-Garcia, G.M.; Duty, C.E.; Love, L.J.; Naskar, A.K.; Blue, C.A.; Ozcan, S.: Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing. In *Composites Science and Technology*, 2014, 105, S. 144–150.
- [Tho16] Thompson, M.K.; Moroni, G.; Vaneker, T.; Fadel, G.; Campbell, I.; Gibson, I.; Bernard, A.; Schulz, J.; Graf, P.; Ahuja, B.; Martina, F.: Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. In *CIRP Annals*, 2016, 65, S. 737–760.
- [Tom09] Tomiyama, T.; Gu, P.; Jin, Y.; Lutters, D.; Kind, C.; Kimura, F.: Design methodologies: Industrial and educational applications. In *CIRP Annals*, 2009, 58, S. 543–565.
- [Ton19] Tong, Y.; Kucukdeger, E.; Halper, J.; Cesewski, E.; Karakozoff, E.; Haring, A.P.; McIlvain, D.; Singh, M.; Khandelwal, N.; Meholic, A.; Laheri, S.; Sharma, A.; Johnson, B.N.: Low-cost sensor-integrated 3D-printed personalized prosthetic hands for children with amniotic band syndrome: A case study in sensing pressure distribution on an anatomical human-machine interface (AHMI) using 3D-printed conformal electrode arrays. In *PloS one*, 2019, 14, e0214120.
- [Tor15] Torres, J.; Cotel, J.; Karl, J.; Gordon, A.P.: Mechanical Property Optimization of FDM PLA in Shear with Multiple Objectives. In *JOM*, 2015, 67, S. 1183–1193.
- [Tor16] Torres, J.; Cole, M.; Owji, A.; DeMastry, Z.; Gordon, A.P.: An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments. In *Rapid Prototyping Journal*, 2016, 22, S. 387–404.

- [Tue16] Türck, E.: Systematische Abbildung von Produktlogik für wissensbasiertes Konzipieren komplexer Produkte. Dr. Hut Verlag, München, 2016.
- [Tur14] Turner, B.N.; Strong, R.; Gold, S.A.: A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. In *Rapid Prototyping Journal*, 2014, 20, S. 192–204.
- [Uhl17] Uhlmann, E. und Kashevko, V.: Untersuchungen zur Herstellung hybrider Werkstoffverbünde mittels Laserstrahlschmelzen am Beispiel der Kupferlegierung CuCr1Zr (2.1293) und Stahl (1.2344). In (Kynast, M.; Eichmann, M.; Witt, G. Hrsg.): *Rapid.Tech - International Trade Show et Conference for Additive Manufacturing. Proceedings of the 14<sup>th</sup> Rapid.Tech Conference Erfurt, Germany, 20–22 June 2017*. Carl Hanser Verlag, München, 2017, S. 345–358.
- [Ulr95] Ulrich, K.: The role of product architecture in the manufacturing firm. In *Research Policy*, 1995, 24, S. 419–440.
- [Ult19a] Ultimaker B.V.: Material compatibility. <https://ultimaker.com/en/resources/49799-material-compatibility>, 30.03.2019.
- [Ult19b] Ultimaker B.V.: Technisches Datenblatt PP, Version 1.006. <https://ultimaker.com/download/67834/TDS%20PP%20v1.006-ger-DE.pdf>, 31.03.2019.
- [Unr15a] Unruh, O.; Haase, T.; Monner, H.P.; Pohl, M.: Aktives akustisches schwarzes Loch zur Schwingungs- und Lärmreduktion (DE102015100442A1), 2015.
- [Unr15b] Unruh, O.; Blech, C.; Monner, H.P.: Numerical and Experimental Study of Sound Power Reduction Performance of Acoustic Black Holes in Rectangular Plates. In *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, 2015, 8, S. 956–963.
- [VA05] von Ardenne, M.; Klemradt, U.; Musiol, G. Hrsg.: *Effekte der Physik und ihre Anwendungen*. Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 2005.
- [Vae13] Vaezi, M.; Chianrabutra, S.; Mellor, B.; Yang, S.: Multiple material additive manufacturing – Part 1: a review. In *Virtual and Physical Prototyping*, 2013, 8, S. 19–50.
- [Val18] Valjak, F.; Bojčetić, N.; Lukić, M.: Design for Additive Manufacturing: Mapping of Product Functions: DS 92: Proceedings of the DESIGN 2018 15<sup>th</sup> International Design Conference. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Croatia; The Design Society, Glasgow, UK, 2018, S. 1369–1380.
- [VDI04] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme (VDI-Richtlinie 2206)*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2004.
- [VDI09] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: *Wissensmanagement im Ingenieurwesen Grundlagen, Konzepte, Vorgehen (VDI-Richtlinie 5610 Blatt 1)*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009.
- [VDI15] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: *Additive Fertigungsverfahren Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen (VDI Richtlinie 3405 Blatt 3)*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2015.
- [VDI17] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: *Wissensmanagement im Ingenieurwesen Wissensbasierte Konstruktion (KBE) (VDI-Richtlinie 5610 Blatt 2)*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2017.

- [VDI18a] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Entwicklung technischer Produkte und Systeme Modell der Produktentwicklung (VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1, Entwurf). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2018.
- [VDI18b] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Entwicklung technischer Produkte und Systeme Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse (VDI-Richtlinie 2221 Blatt 2, Entwurf). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2018.
- [VDI19] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Additive Fertigungsverfahren Gestaltungsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Materialextrusionsverfahren (VDI-Richtlinie 3405 Blatt 3.4, Entwurf). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2019.
- [VDI82] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Konstruktionsmethodik Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen (VDI-Richtlinie 2222, Blatt 2). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1982.
- [VDI93] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte (VDI-Richtlinie 2221). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1993.
- [VDI97] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Konstruktionsmethodik Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien (VDI-Richtlinie 2222, Blatt 1). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1997.
- [Ver12] Verhagen, W.J.C.; Bermell-Garcia, P.; van Dijk, R.E.C.; Curran, R.: A critical review of Knowledge-Based Engineering: An identification of research challenges. In *Advanced Engineering Informatics*, 2012, 26, S. 5–15.
- [vol19] volaprint 3 de-store: Technisches Datenblatt – TPU-93. [http://volaprint.de/download.html?file=files/pics/Datenblaetter/Datenblatt%20TPU\\_93\\_Transparent\\_A4.pdf](http://volaprint.de/download.html?file=files/pics/Datenblaetter/Datenblatt%20TPU_93_Transparent_A4.pdf), 31.03.2019.
- [VW02] Van Wie, M.J.: *Designing Product Architecture: A Systematic Method*. Dissertation, Austin, USA, 2002.
- [Wal17] Wallis, C.; Buchmayr, B.; Kitzmantel, M.: Hybride Werkstoffsysteme mit komplexer 3D Struktur zur Fertigung von Hochleistungs-Kühlkörper. In (Kynast, M.; Eichmann, M.; Witt, G. Hrsg.): *Rapid.Tech - International Trade Show et Conference for Additive Manufacturing*. Proceedings of the 14<sup>th</sup> Rapid.Tech Conference Erfurt, Germany, 20–22 June 2017. Carl Hanser Verlag, München, 2017, S. 359–376.
- [Wan07] Wang, T.-M.; Xi, J.-T.; Jin, Y.: A model research for prototype warp deformation in the FDM process. In *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 33, S. 1087–1096.
- [Wan18] Wang, L. und Gardner, D.J.: Contribution of printing parameters to the interfacial strength of polylactic acid (PLA) in material extrusion additive manufacturing. In *Progress in Additive Manufacturing*, 2018, 3, S. 165–171.
- [Wan19] Wang, Z.; Guan, X.; Huang, H.; Wang, H.; Lin, W.; Peng, Z.: Full 3D Printing of Stretchable Piezoresistive Sensor with Hierarchical Porosity and Multimodulus Architecture. In *Advanced Functional Materials*, 2019, 29, S. 1807569.
- [War00] Wartzack, S.: *Predictive Engineering - Assistenzsystem zur multikriteriellen Analyse alternativer Produktkonzepte*. Dissertation, Erlangen-Nürnberg, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000.

- [War17] Wartzack, S.; Sauer, C.; Küstner, C.: What does Design for Production mean? – From Design Guidelines to Self-learning Engineering. In (Meyer, A.; Schirmeyer, R.; Vajna, S. Hrsg.): Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Workshop on Integrated Design Engineering, 2017, S. 93–102.
- [Wat16] Watschke, H.; Kumke, M.; Vietor, T.: Design for Additive Manufacturing – Praxisnahe Hilfsmittel zur Identifikation und Nutzung konstruktiver Freiheiten. In (Brökel, K. et al. Hrsg.): 14. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2016. Traditio et Innovatio – Entwicklung und Konstruktion, am 6. und 7. Oktober 2016 in Rostock. Shaker Verlag, Aachen, 2016, S. 38–46.
- [Wat17a] Watschke, H.; Rautenberg, D.; Waalkes, L.; Junior, C.S.; Vietor, T.: Integration leitfähiger Funktionen mittels Fused Layer Modeling. In (Kynast, M.; Eichmann, M.; Witt, G. Hrsg.): Rapid.Tech - International Trade Show et Conference for Additive Manufacturing. Proceedings of the 14<sup>th</sup> Rapid.Tech Conference Erfurt, Germany, 20–22 June 2017. Carl Hanser Verlag, München, 2017, S. 419–432.
- [Wat17b] Watschke, H.; Bavendiek, A.-K.; Giannakos, A.; Vietor, T.: A methodical approach to support ideation for additive manufacturing in design education. In (Maier, A. et al. Hrsg.): DS 87-5 Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Conference on Engineering Design (ICED 17). Vol. 5: Design for X, Design to X. The Design Society, Glasgow, 2017, S. 41–50.
- [Wat18] Watschke, H.; Waalkes, L.; Schumacher, C.; Vietor, T.: Development of Novel Test Specimens for Characterization of Multi-Material Parts Manufactured by Material Extrusion. In Applied Sciences, 2018, 8, S. 1220.
- [Wat19a] Watschke, H.; Hilbig, K.; Vietor, T.: Design and Characterization of Electrically Conductive Structures Additively Manufactured by Material Extrusion. In Applied Sciences, 2019, 9, S. 779.
- [Wat19b] Watschke, H.; Gruhn, H.; Fischer, V.; Vietor, T.: Verbesserung der Klebeignung von Polypropylen durch additiv gefertigte Oberflächenstrukturen und Multi-Material-Druck. In (Lachmayer, R.; Lippert, R. B.; Kaierle, S. Hrsg.): Konstruktion für die Additive Fertigung 2018. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2019.
- [Wat19c] Watschke, H.; Kuschmitz, S.; Heubach, J.; Lehne, G.; Vietor, T.: A Methodical Approach to Support Conceptual Design for Multi-Material Additive Manufacturing: Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED 19), Delft, The Netherlands, 5–8 August, 2019, S. 659–668.
- [Wee19] Weeger, O.; Boddeti, N.; Yeung, S.-K.; Kaijima, S.; Dunn, M.L.: Digital design and nonlinear simulation for additive manufacturing of soft lattice structures. In Additive Manufacturing, 2019, 25, S. 39–49.
- [Wei16] Weiss, F.; Binz, H.; Roth, D.: Conception of a design catalogue for the development of functionalities with additive manufacturing: DS 85-2: Proceedings of NordDesign 2016, Volume 2, 2016.
- [Wei18] Weiss, F.; Roth, D.; Binz, H.: Content and Functions of an Internet-Based Platform for Supporting Development of Additively Manufactured Parts: DS 92: Proceedings of the DESIGN 2018 15<sup>th</sup> International Design Conference. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Croatia; The Design Society, Glasgow, UK, 2018, S. 1417–1428.

- [Wen09] Wendel, B.: Prozessuntersuchung des Fused Deposition Modeling. Univ. Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Erlangen, 2009.
- [Wit15] Wittbrodt, B. und Pearce, J.M.: The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components. In *Additive Manufacturing*, 2015, 8, S. 110–116.
- [Woh18] Wohlers Associates: Wohlers Report 2018 - 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report. Wohlers Associates, Fort Collins, 2018.
- [Wu15] Wu, W.; Geng, P.; Li, G.; Zhao, Di; Zhang, H.; Zhao, J.: Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS. In *Materials*, 2015, 8, S. 5834–5846.
- [Wu17] Wu, W.; Ye, W.; Wu, Z.; Geng, P.; Wang, Y.; Zhao, J.: Influence of Layer Thickness, Raster Angle, Deformation Temperature and Recovery Temperature on the Shape-Memory Effect of 3D-Printed Polylactic Acid Samples. In *Materials (Basel, Switzerland)*, 2017, 10.
- [XST19a] XSTRAND™: Technisches Datenblatt – GF30-PA6 by XSTRAND™.  
<https://dcpd6wotaa0mb.cloudfront.net/mdms/dms/CSB/10022733/10022733-%E2%80%93XSTRAND%E2%84%A2-3D-GF30-PA6-3D-Filament-glass-fiber-reinforced-polyamide-6.pdf?v=1520934344000>, 31.03.2019.
- [XST19b] XSTRAND™: Technisches Datenblatt – GF30-PP by XSTRAND™.  
<https://dcpd6wotaa0mb.cloudfront.net/mdms/dms/CSB/10022732/10022732-%E2%80%93XSTRAND%E2%84%A2-3D-GF30-PP-3D-Filament-glass-fiber-reinforced-polypropylene.pdf?v=1519729777000>.
- [Yan15a] Yang, S.; Tang, Y.; Zhao, Y.F.: A new part consolidation method to embrace the design freedom of additive manufacturing. In *Journal of Manufacturing Processes*, 2015, 20, S. 444–449.
- [Yan15b] Yang, S. und Zhao, Y.F.: Additive manufacturing-enabled design theory and methodology: a critical review. In *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 80, S. 327–342.
- [Yan16] Yang, S. und Zhao, Y.F.: Conceptual design for assembly in the context of additive manufacturing: Proceedings of the 27<sup>th</sup> Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF 2016), 2016, S. 1932–1944.
- [Yan18] Yang, S.; Page, T.; Zhao, Y.F.: Understanding the Role of Additive Manufacturing Knowledge in Stimulating Design Innovation for Novice Designers: Proceedings of the ASME 2018 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Volume 4: 23<sup>rd</sup> Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference; 12<sup>th</sup> International Conference on Micro- and Nanosystems. ASME, 2018, V004T05A003.
- [Yao18a] Yao, S.-S.; Jin, F.-L.; Rhee, K.Y.; Hui, D.; Park, S.-J.: Recent advances in carbon-fiber-reinforced thermoplastic composites: A review. In *Composites Part B: Engineering*, 2018, 142, S. 241–250.
- [Yao18b] Yao, X.; Moon, S.K.; Bi, G.; Wei, J.: A multi-material part design framework in additive manufacturing. In *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 16, S. 2369.



- [Yil10] Yilmaz, S. und Seifert, C.M.: Cognitive Heuristics in Design Ideation: DS 60: Proceedings of DESIGN 2010, the 11<sup>th</sup> International Design Conference, 2010, S. 1007–1016.
- [Zha16] Zhang, D.; Chi, B.; Li, B.; Gao, Z.; Du, Y.; Guo, J.; Wei, J.: Fabrication of highly conductive graphene flexible circuits by 3D printing. In *Synthetic Metals*, 2016, 217, S. 79–86.
- [Zha17] Zhang, J.; Yang, B.; Fu, F.; You, F.; Dong, X.; Dai, M.: Resistivity and Its Anisotropy Characterization of 3D-Printed Acrylonitrile Butadiene Styrene Copolymer (ABS)/Carbon Black (CB) Composites. In *Applied Sciences*, 2017, 7, S. 20.
- [Zhu17a] Zhu, Z.; Pradel, P.; Bibb, R.; Moultrie, J.: A Framework for Designing End Use Products for Direct Manufacturing Using Additive Manufacturing Technologies. In (Maier, A. et al. Hrsg.): *DS 87-5 Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Conference on Engineering Design (ICED 17)*. Vol. 5: Design for X, Design to X. The Design Society, Glasgow, 2017, S. 327–336.
- [Zhu17b] Zhuang, Y.; Song, W.; Ning, G.; Sun, X.; Sun, Z.; Xu, G.; Zhang, B.; Chen, Y.; Tao, S.: 3D–printing of materials with anisotropic heat distribution using conductive polylactic acid composites. In *Materials & Design*, 2017, 126, S. 135–140.
- [Zie12] Ziebart, J.R.: Ein konstruktionsmethodischer Ansatz zur Funktionsintegration. Dr. Hut Verlag, München, 2012.



# A KONSTRUKTIONSPRINZIPIEN FÜR DIE MMM

## A.1 Auswahl identifizierter Konstruktionsprinzipien

Lösungsprinzipien stellen einen entscheidenden Faktor in der Suche nach und in der Entwicklung von alternativen Lösungsansätzen dar. Eine mögliche Form der Bereitstellung sind grob strukturierte Lösungssammlungen, die als Wissensspeicher eine Vorstufe von Konstruktionskatalogen darstellen [VDI82]. Die in Abschnitt 5.1 vorgestellten Vorgehensweisen zur Identifikation und Ableitung von Konstruktionsprinzipien für die MMM werden genutzt, um beispielhaft eine Auswahl von Konstruktionsprinzipien zu identifizieren und in einer Lösungssammlung zu strukturieren. Die Sammlung der Prinzipien ist in Tabelle A.1 dargestellt. Diese sind den allgemeinen Größen und Funktionsklassen zugeordnet sowie mit den für die Umsetzung zugrundeliegenden Materialeigenschaften verknüpft. Eine Strukturierung erfolgt nach Oberkategorien von Eigenschaften.

**Tabelle A.1:** Sammlung ausgewählter Konstruktionsprinzipien für die MMM (aufbauend auf [Wat19c])

	Nr.	Titel	Zuordnung zu Funktion(en)	Verknüpfte Materialeigenschaft(en)	Quelle
Mechanisch-technologische Eigenschaften	01	Integration von Gelenken durch eine Kombination von starren und flexiblen Materialien	Mech. Energie lenken/führen; Feststoff umformen	Hohe Steifigkeit; niedrige Steifigkeit	[Col17; Ion16]
	02	Integration von passiven Dämpfungsstrukturen durch eine Kombination von starren und flexiblen Materialien	Mech./akustische Energie leiten/extrahieren; Feststoff umformen	Hohe Steifigkeit (Biegemodul); niedrige Steifigkeit (Biegemodul)	[Rot17; Rot18]
	03	Integration von lokalen Versteifungen durch eine Kombination von Materialien mit unterschiedlichen Steifigkeiten	Mechanische Energie leiten; Feststoff stabilisieren	Hohe Steifigkeit (E-Modul)	[Esp14; Mos17]
	04	Integration von Gleitlagerelementen durch eine lokale Verwendung abriebfester Materialien	Mechanische Energie leiten; Feststoff bewegen/halten	Hohe Abriebfestigkeit; Reibkoeffizient; Selbstschmierung	[igu19]
	05	Integration federnder Elemente durch eine Kombination von starren und flexiblen Materialien	Mechanische Energie extrahieren; Feststoff umformen	Hohe Steifigkeit; niedrige Steifigkeit	[Big18a; Big18b]
	06	Integration von bistabilen Faltmechanismen durch eine Kombination von starren/flexiblen Materialien und Nachgiebigkeitsmechanismen	Mech. Energie speichern; Feststoff umformen/stabilisieren/halten	Hohe Steifigkeit; niedrige Steifigkeit	[Sau18]
Elektrische Eigenschaften	07	Integration von elektrischen Leitern durch eine lokale Verwendung elektrisch leitfähiger Materialien	Elektrische Energie leiten/bereitstellen/übertragen/verknüpfen/trennen	Hohe elektrische Leitfähigkeit; niedrige elektrische Leitfähigkeit	[3de15; Kwo17; Mul18]
	08	Integration von elektrischen Komponenten durch eine lokale Verwendung elektrisch leitfähiger Materialien	Elektrische Energie leiten/bereitstellen/umwandeln/halten/stoppen	Hohe elektrische Leitfähigkeit; niedrige elektrische Leitfähigkeit	[Ham17]
	09	Integration von wärmeabstrahlenden Strukturen durch eine lokale Verwendung elektrisch leitfähiger Materialien	Elektrische Energie leiten/umwandeln; thermische Energie bereitstellen	Hohe elektrische Leitfähigkeit; niedrige elektrische Leitfähigkeit; Durchlässigkeit für Infrarotstrahlung	[Dul18; Wat17a; Wat19a]
	10	Integration taktiler Sensoren/Eingabeelemente durch eine lokale Verwendung elektrisch leitfähiger Materialien mit kapazitiven Eigenschaften	Elektrische Energie ändern/umwandeln; Information bereitstellen	Elektrische Leitfähigkeit; Änderung der elektrischen Kapazität	[Bur15; Lei12; Liu18]
	11	Integration von Verformungssensoren durch eine lokale Verwendung elektrisch leitfähiger Materialien mit piezoresistiven Eigenschaften	Elektrische Energie ändern/umwandeln; Information bereitstellen; Feststoff umformen	Elektrische Leitfähigkeit; Widerstandsänderung bei Verformung; niedrige Steifigkeit	[Kim17; Lei12; Liu18]
	12	Integration von Temperatursensoren durch eine lokale Verwendung elektrisch leitfähiger Materialien mit temperaturabhängigem Widerstand	Thermische Energie umwandeln; Information bereitstellen	Elektrische Leitfähigkeit; Änderung des Widerstands durch Temperatur	[Kwo17]
	13	Integration elektrisch/magnetisch abschirmender Strukturen durch die lokale Verwendung elektrisch leitfähiger Strukturen	Elektromagnetische Energie umwandeln/stoppen/trennen	Elektrische Leitfähigkeit/Iso-lierung	[Ecc19]

Fortsetzung von Tabelle A.1

Optische Eigensch.	14	Integration lichtdurchlässiger Strukturen durch die lokale Verwendung transparenter Materialien	Energie leiten/lenken	Transparenz	
	15	Integration optischer Signale durch die Verwendung fluoreszierender Materialien	Information/Zustand bereitstellen; Energie umwandeln	Fluoreszierende Eigenschaft	
	16	Integration optischer Signale durch die Kombination elektrisch leitfähiger und thermochromen Materialeigenschaften	Information/Zustand bereitstellen; thermische Energie umwandeln	Thermochrome Eigenschaft; elektrische Leitfähigkeit	[Wat17a; Wat19a]
Zeitlich veränderliche Eigenschaften	17	Integration von Gelenkstrukturen durch die Verwendung von Materialien mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten	Thermische Energie wandeln; Feststoff umformen	Temperaturbedingte Wärmeausdehnung; Verformbarkeit/niedrige Steifigkeit	[Mon17]
	18	Integration von Gelenkstrukturen/beweglichen Elementen durch die lokale Verwendung von Materialien mit Formgedächtniseigenschaften	Thermische Energie wandeln; Feststoff umformen	Formgedächtniseigenschaft; Verformbarkeit/niedrige Steifigkeit	[Obe19; Yan18]
	19	Integration von Aktuatoren/Antrieben durch die lokale Verwendung von Materialien mit Formgedächtniseigenschaften und Wärmeabstrahlung	Therm. Energie wandeln; Mech. Energie bereitstellen/speichern; Steuerung bereitstellen; Feststoff umformen	Formgedächtniseigenschaft; Verformbarkeit; elektrische Leitfähigkeit	[Mon17; Wat17a; Wat19a]
	20	Integration selbstreparierender energieabsorbierender Strukturen durch eine Kombination von flexiblen Materialien und Materialien mit Formgedächtniseigenschaften	Thermische Energie wandeln; Mechanische Energie bereitstellen/speichern; Feststoff umformen	Formgedächtniseigenschaft; Verformbarkeit/hohe Bruchdehnung	
	21	Integration ergonomischer/körperangepasster Strukturen durch eine lokale Verwendung von Materialien mit Formgedächtniseigenschaften	Therm. Energie umwandeln; Mech. Energie wandeln/halten; Feststoff umformen	Formgedächtniseigenschaft; Verformbarkeit; elektrische Leitfähigkeit	
Magnetische Eig.	22	Integration magnetischer Lager-/Führungselemente durch die Verwendung von Materialien mit magnetischen Eigenschaften	Feststoff halten/stabilisieren/bewegen; Magnetische Energie bereitstellen	Magnetische Eigenschaft/Magnetisierbarkeit	[3dr18]
	23	Integration von Schließmechanismen durch die lokale Verwendung von Materialien mit magnetischen Eigenschaften	Mechanische Energie halten/positionieren; Magnetische Energie bereitstellen	Magnetische Eigenschaft	

In Tabelle A.2 ist die Zuordnung der identifizierten Konstruktionsprinzipien zu den allgemeinen Größen Stoff, Energie und Information sowie zu den Funktionsklassen und Operationen aufgeführt. Sie dient als Grundlage für einen funktionsorientierten Zugriff auf die Prinzipien.

Tabelle A.2: Einordnung der identifizierten Konstruktionsprinzipien in die Zugriffslogik (basierend auf [Wat19c])

		Funktionsklassen und Operationen					
		Speichern/ Bereitstellen <sup>4</sup>	Leiten <sup>5</sup>	Vereinigen <sup>6</sup>	Verzweigen <sup>7</sup>	Umformen <sup>8</sup>	Wandeln <sup>9</sup>
Allgemeine Größen	Stoff <sup>1</sup>	P03, P04, P06	P22			P01, P02, P04, P05, P06, P11, P17, P18, P19, P20, P21, P22	
	Energie <sup>2</sup>	P02, P05, P06, P07, P08, P09, P13, P19, P20, P21, P22, P23	P01, P02, P03, P04, P07, P08, P09, P14	P07	P07, P13	P10, P11	P07, P08, P09, P10, P11, P12, P13, P15, P16, P17, P18, P19, P20, P21
	Information <sup>3</sup>	P10, P11, P12, P15, P16, P19					

Allgemeine Größen: <sup>1</sup> Mensch, Gas, Flüssigkeit, Feststoff; <sup>2</sup> menschlich, akustisch, biologisch, chemisch, elektrisch, elektromagnetisch, hydraulisch, magnetisch, mechanisch, pneumatisch, radioaktiv, thermisch; <sup>3</sup> Zustand, Steuerung;

Funktionsklassen/Operationen: <sup>4</sup> extrahieren, stoppen, stabilisieren, halten; <sup>5</sup> importieren, exportieren, übertragen, befördern, lenken, rotieren;

<sup>6</sup> verknüpfen, mischen; <sup>7</sup> trennen, entfernen, verfeinern, verteilen; <sup>8</sup> bewegen, regulieren, ändern, formen, konditionieren; <sup>9</sup> umwandeln

## B SCHICHTVERBUNDGESTALTUNG

### B.1 Charakterisierung der Schichtverbundhaftung

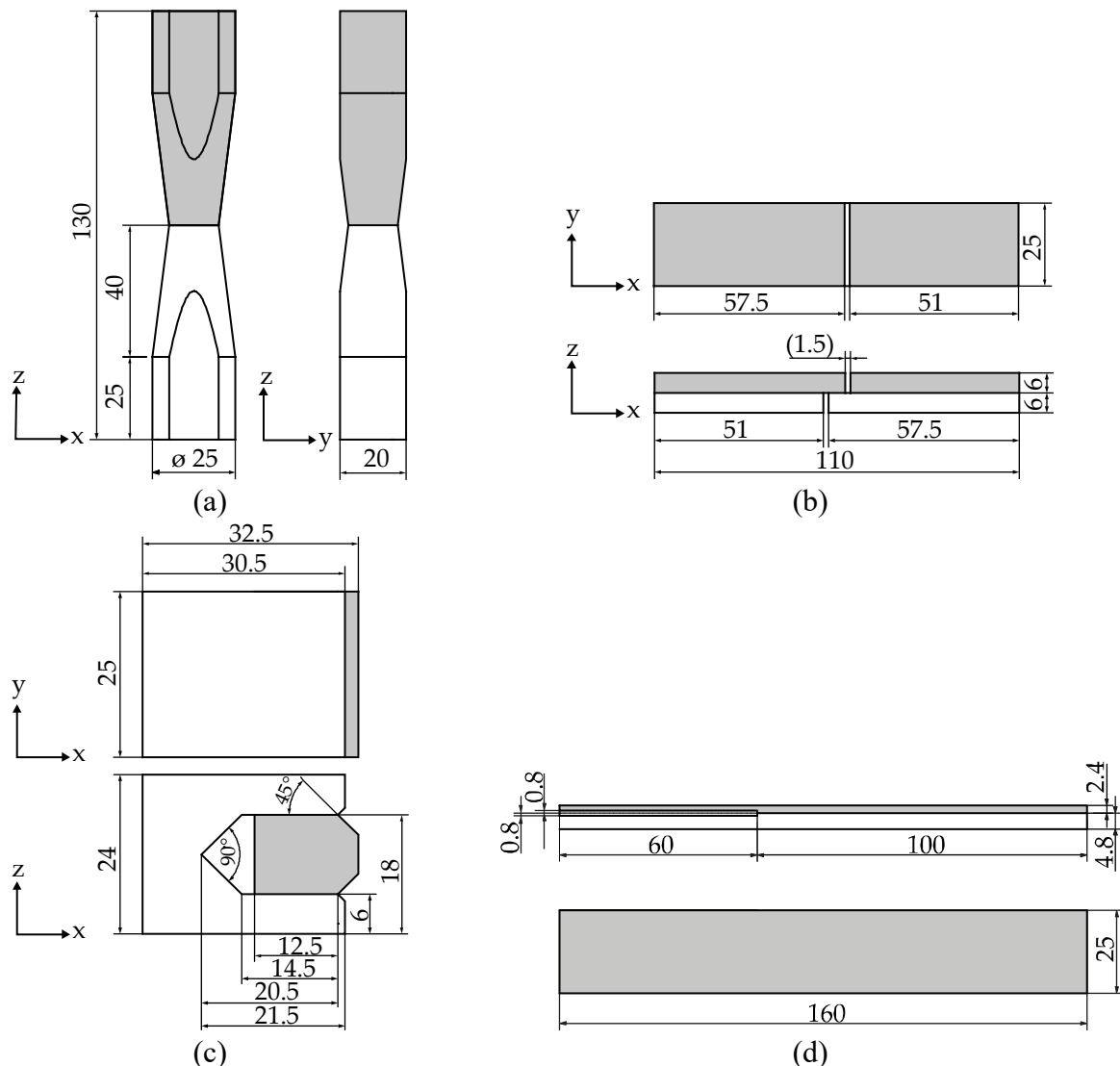
Tabelle B.1 zeigt eine Übersicht von unterschiedlichen Studien zur Charakterisierung des Einflusses von Prozessparametervariationen auf unterschiedliche mechanisch-technologische Eigenschaften wie Festigkeit und Steifigkeit im Kontext der Materialextrusion. Neben der Belastungsart sind die verwendeten Prüfstandards, die Materialien und die variierten Prozessparameter aufgeführt. Die Untersuchung der prozessspezifischen Einflussfaktoren ist gekennzeichnet (●).

**Tabelle B.1:** Übersicht unterschiedlicher Studien zur Charakterisierung von mittels MEX hergestellter Prüfkörper unter Angabe der betrachteten Prozessparameter (basierend auf [Wat18])

Belastung	Material	Norm	Prozessparametervariation										Studie	
			Luftpalt	Linienbreite	Orientierung	Plattformtemp.	Füllmusterart	Füllmusterorien.	Füllgrad	Schichthöhe	Verfahreneschw.	Düsentemp.	Schichtdesign	
Zug	PLA	ASTM D3039								●		●	●	[Spo17]
	ABS, PC	ASTM D638			●			●		●				[Can17]
	PLA	ASTM D638			●		●	●	●	●	●	●		[Tor16]
	ABS	DIN EN ISO 527			●			●						[Dur14]
	PP	DIN 53504						●		●				[Car15]
	ABS	ASTM D3039					●		●					[Fer16]
	PLA	ASTM D638												[Wit15]
	PLA	ASTM D638			●					●	●			[Cha17]
Druck	ABS	DIN EN ISO 604	●	●	●			●		●				[Soo12]
	ABS	ASTM D695/D3039			●									[Ahn02]
	ABS	ASTM D695	●	●	●		●							[Ang06]
	ABS	ASTM D695			●									[Lee07]
Biegung	ABS	DIN EN ISO 178			●			●						[Dur14]
	ABS	DIN EN ISO 178	●	●	●			●		●				[Soo10]
	ABS	GB/T 9341-2008						●		●				[Wu15]
	PLA	GB/T 9341-2008	●		●			●		●				[Liu17]
	ABS	ASTM D1184-98				●		●				●		[Sun08]
Scherung	PLA	ASTM D1184-98	●			●								[Wan18]
	ABS, PC	ASTM D5379			●			●						[Can17]
	PLA	ASTM E143							●	●				[Tor15]

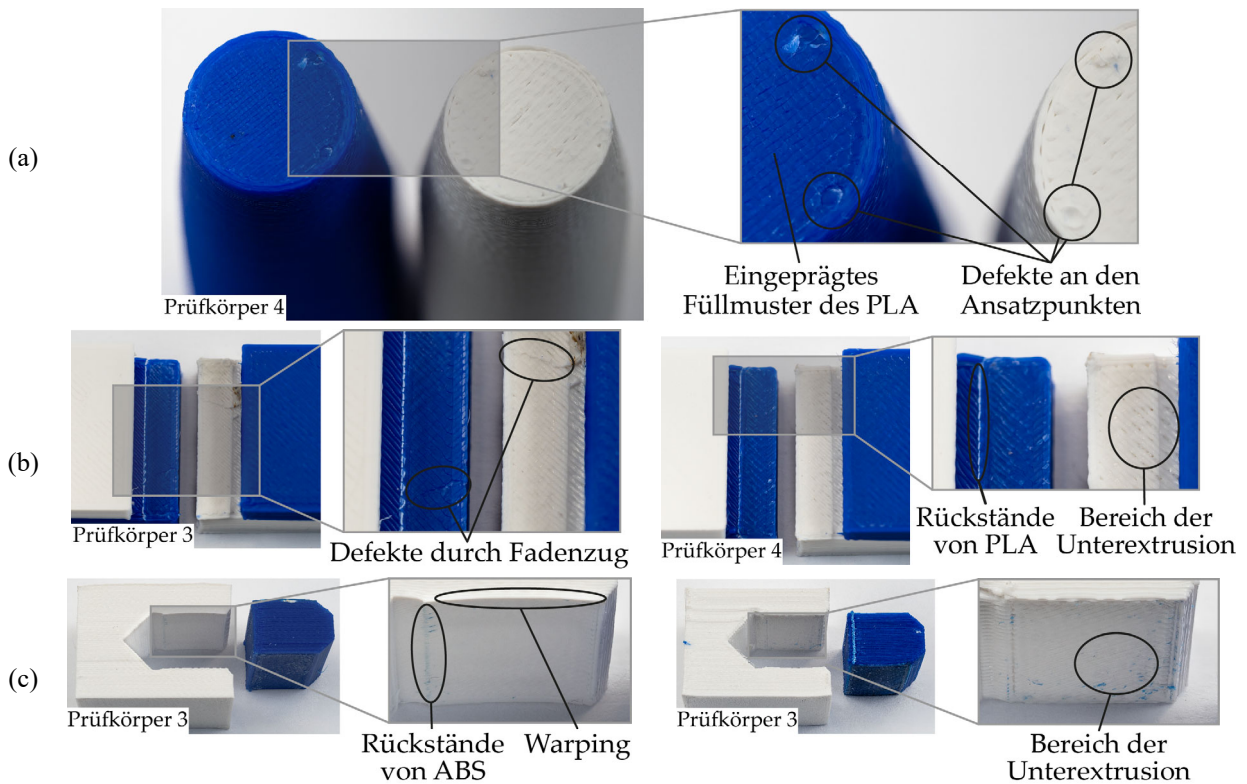
In Abbildung B.1 sind die Abmessungen der entwickelten Prüfkörper (siehe Abschnitt 6.1) für die Belastungen Zug, Zug-Scher, Druck-Scher und Schälung dargestellt. Die Prüfkörper (a) bis (c) sind zur Charakterisierung der Verbundhaftung der Kombination aus zwei starren Materialien – in

diesem Fall PLA und ABS – genutzt worden. Prüfkörper (d) ist für die Untersuchung der Verbundfestigkeit von starren und flexiblen Materialien u.a. für die Kombination von PLA und TPU sowie ABS und TPU eingesetzt worden.



**Abbildung B.1:** Abmessungen der entwickelten Prüfkörper zur Charakterisierung der Verbundhaftung in Millimeter für die unterschiedlichen Belastungsarten (a) Zug, (b) Zug-Scher, (c) Druck-Scher (Skalierung 2:1) und (d) Schälung (basierend auf [Fre19; Wat18])

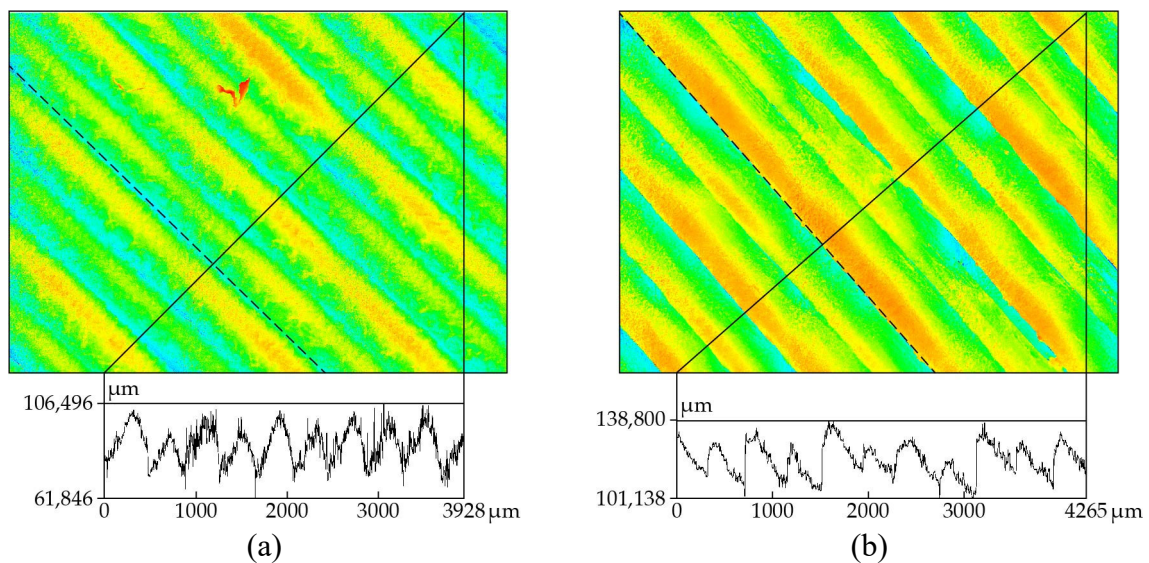
Abbildung B.2 zeigt ausgewählte Bruchbilder der experimentellen Untersuchungen zur Validierung der entwickelten Prüfkörpergeometrien aus Abschnitt 6.1.2. Hieraus lassen sich Anhaltspunkte für die Abweichungen in den Versuchen ableiten, sodass sie die Grundlage für die Analyse bilden. Auf den Bruchbildern (a) und (b) sind u.a. Fehlstellen aufgrund von verfahrenstechnischen Eigenheiten und Fertigungsungenauigkeiten zu erkennen, durch die wahrscheinlich eine Kerbwirkung erzeugt wird, die wiederum zu einer Reduzierung der maximal übertragbaren Kraft führt. Weiterhin können aufgrund von Vorschubproblemen oder einem schwankenden Filamentdurchmesser Unterextrusionen entstehen, die ebenfalls zu einer Schwächung des Schichtverbunds führen, wie dies in Bild (b) und (c) dargestellt ist. Aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten der beiden Materialien ABS und PLA kann es zudem zu einer Verformung kommen, welche potenziell zu einer Steigerung der Scherfestigkeit führt (siehe Bild (c)).



**Abbildung B.2:** Bruchbilder der Versuche zur Ermittlung der Verbundfestigkeit für die Materialkombination PLA und ABS für die Belastungen (a) Zug, (b) Zugscher und (c) Druckscher (basierend auf [Wat18])

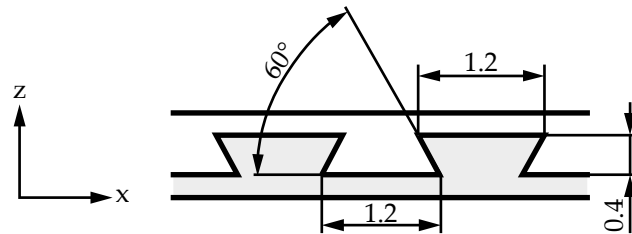
## B.2 Experimentelle Untersuchungen zur Verbundhaftung

Abbildung B.3 zeigt die mittels Laser-Scanning-Mikroskop aufgenommenen Höhenprofile der nicht geglätteten (a) und der geglätteten (b) Probe aus PLA. Durch die Glättung wird die Oberflächenrauheit um etwa ein Viertel von 35 auf 26  $\mu\text{m}$  reduziert. Die Ermittlung der Rauheit ( $R_c$ ) erfolgt manuell in Anlehnung an DIN EN ISO 4287 senkrecht zu den extrudierten Materialsträngen, wobei eine Einzelmessstrecke einer Linienbreite entspricht.



**Abbildung B.3:** Aufnahmen des mittels Laser-Scanning-Mikroskop ermittelten Höhenprofils einer (a) nicht geglätteten mit  $R_c \approx 35 \mu\text{m}$  und (b) geglätteten Probe  $R_c \approx 26 \mu\text{m}$  (basierend auf [Fre19])

In Abbildung B.4 ist die Gestaltung der Nut-Feder-Verbindung schematisch mit Angabe der Abmessungen in Millimeter aufgeführt. Der Überlappungsbereich in Baurichtung (z) entspricht bei einer Schichthöhe von 0,2 mm zwei Schichten. Der Überhang wird aufgrund des Treppenstufeneffekts in Abhängigkeit von dem Überhangwinkel ( $60^\circ$ ) bei der Fertigung angenähert.



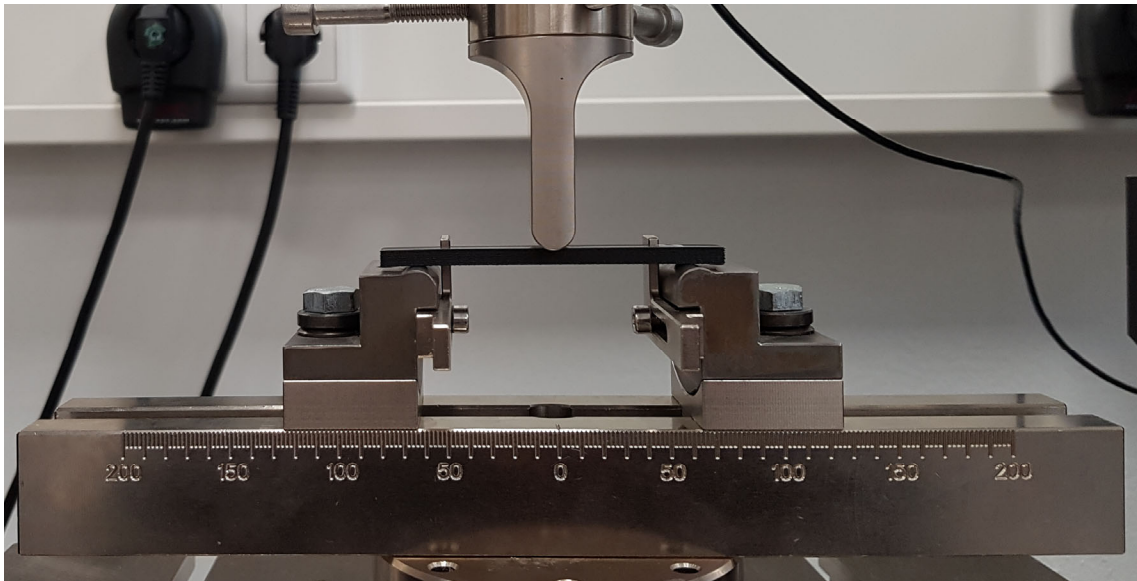
**Abbildung B.4:** Schematische Darstellung der für die mechanische Verankerung genutzten Nut-Feder-Verbindung



## C KENNWERTERMITTLUNG

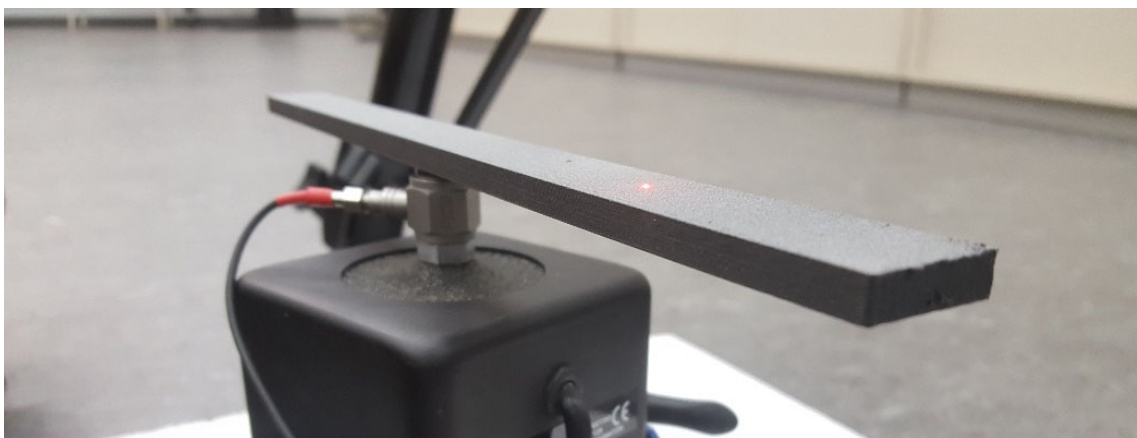
### C.1 Charakterisierung von dämpfenden Strukturen

In Abbildung C.1 ist der Versuchsaufbau für die Bestimmung der Biegemoduln mittels 3-Punkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 178 gezeigt. Die Ermittlung des Biegemoduls erfolgt über den Traversenweg, wobei die Prüfgeschwindigkeit auf 2 mm/min und die Messspannlänge auf 64 mm festgelegt werden. Die Abbildung zeigt einen Probekörper aus PLA.



**Abbildung C.1:** Aufbau des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 178 [DIN17c]

Zur Ermittlung der Dämpfung werden die Probekörper mit einem elektrodynamischen Shaker angeregt (siehe Abbildung C.2). Die Ermittlung der Oberflächengeschwindigkeit erfolgt mittels Laser-Scanning-Vibrometer, wobei zwischen Shaker und Probekörper ein Kraftsensor verbaut ist. Die Oberflächengeschwindigkeit wird mit der anregenden Kraft normiert und anschließend über die Oberfläche der Probe gemittelt. Die experimentellen Untersuchungen werden bei einer Umgebungstemperatur von 19 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 44% durchgeführt. Die Proben werden für die Messungen auf der Oberseite mit einem speziellen Spray vorbehandelt, um Reflexionen zu reduzieren.



**Abbildung C.2:** Versuchsaufbau der Dämpfungsmessung ( [Rot18])

## C.2 Charakterisierung von elektrisch leitfähigen Strukturen

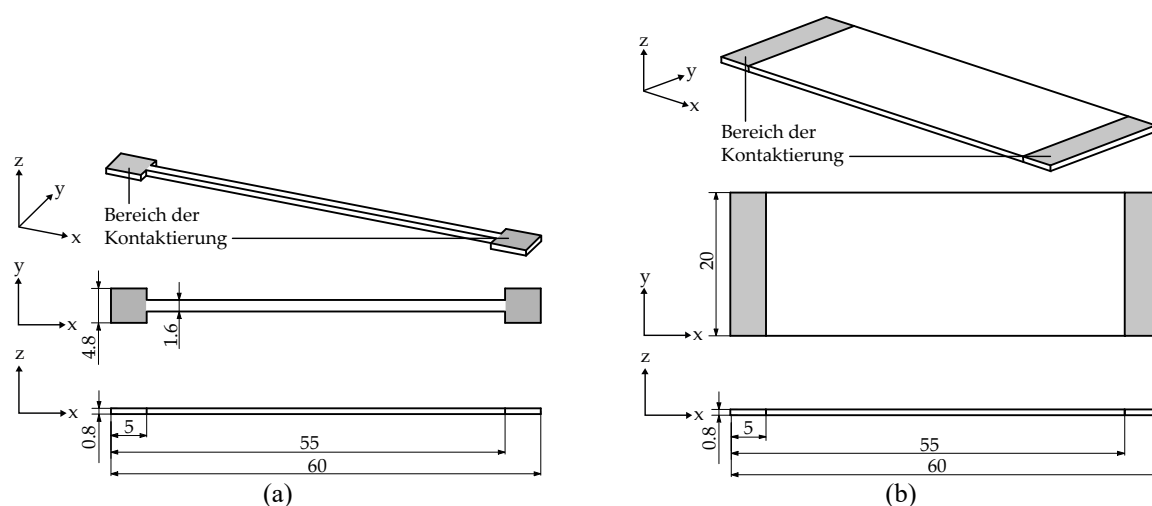
Tabelle C.1 zeigt ausgewählte Untersuchungen, in denen die Einflussfaktoren in Bezug auf den resultierenden elektrischen Widerstand von mittels MEX hergestellter Strukturen ermittelt wurde. Neben prozessbezogenen Einflussgrößen ist der Geometrieinfluss implizit in der Bauteilorientierung berücksichtigt. Sofern ein Zusammenhang zwischen dem elektrischen Widerstand und dem jeweiligen Prozessparameter untersucht wurde, ist dieser in der Tabelle gekennzeichnet (●).

**Tabelle C.1:** Übersicht ausgewählter Studien zur Identifikation von prozessspezifischen Einflussfaktoren auf den elektrischen Widerstand von mittels MEX hergestellter Strukturen (basierend auf [Wat19a])

Material	Füllstoff	Prozessparameter											Studie
	Art	Variation Anteil	Bauteilorientierung	Schichthöhe	Füllmusterorientier.	Extrusionsbreite	Luftspalt/Flussrate	Extrusionstemp.	Verfahrgeschwindig.	Bauteilkühlung	Kontaktierung	Charakterisierung mech. Eigenschaften	
PLA	CB				●		●	●					[Wat17a]
ABS	CNT	●	●		(●)				(●)			●	[Dul18]
PLA	CB			●				●	●	●			[Ham17]
PA6, HDPE <sup>1</sup>	Nickel, tin alloy	●	●									●	[Tan18]
PP	CB	●	(●)										[Kwo17]
TPU	MWCNT <sup>2</sup>	●	●									●	[Chr17]
ABS	CB		●	●		●	●						[Zha17]
TPU	MWCNT		●								(●)		[Kim17]

<sup>1</sup> HDPE, High-Density Polyethylen; <sup>2</sup> MWCNT, engl. multiwalled CNT

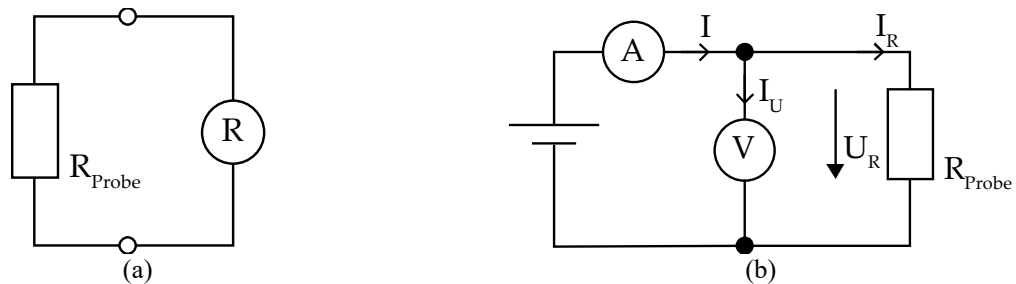
In Abbildung C.3 sind die verwendeten Prüfkörper zur Charakterisierung von Prozessparametervariationen in Bezug auf den (a) spezifischen Widerstand und die Ermittlung von (b) Strom-Spannungs-Kennlinien von wärmeabstrahlenden Strukturen dargestellt. Die Bereiche der Kontaktierung sind grau eingefärbt und entsprechend gekennzeichnet.



**Abbildung C.3:** Probekörper zur Charakterisierung des (a) spezifischen Widerstands und zur Ermittlung der (b) Strom-Spannungs-Kennlinien der wärmeabstrahlenden Strukturen (basierend auf [Wat19a])

Zur Charakterisierung des spezifischen Widerstands und zur Aufnahme der Strom-Spannungs-Kennlinien werden unterschiedliche Messaufbauten verwendet, die in Abbildung C.4 gezeigt sind.

Für die Bestimmung des spezifischen Widerstands wird der elektrische Widerstand mithilfe von Messaufbau (a) und Gleichung (C.1) ermittelt. Zur Ermittlung der Strom-Spannungs-Kennlinien der wärmeabstrahlenden Strukturen wird Messaufbau (b) verwendet. Als Spannungsversorgung wird ein VOLTcraft VLP 2403pro eingesetzt. Für die Messung der Spannung und des Stroms werden ein VOLTcraft MT-52 bzw. ein VOLTcraft VC-110 eingesetzt. Die Berechnung des elektrischen Widerstands der Proben und des Stroms erfolgt mithilfe der Gleichungen (C.2) und (C.3).



**Abbildung C.4:** Messaufbau zur (a) Ermittlung des spezifischen Widerstands und (b) zur Charakterisierung der Probekörper zur Bestimmung der Strom-Spannungs-Kennlinien (basierend auf [Wat19a])

Gleichung (C.1) wird zur Ermittlung des spezifischen elektrischen Widerstands der Probekörper (a) (siehe Abbildung C.3) genutzt, wobei  $R$  den gemessenen elektrischen Widerstand,  $A$  die Querschnittsfläche der Probe und  $l$  die Probenlänge zwischen der Kontaktierung darstellen.

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l} \quad (C.1)$$

Zur Bestimmung des Probenwiderstands in Messaufbau (b) werden Gleichung (C.2) und Gleichung (C.3) verwendet, wobei  $R_{Impedanz}$  10 M $\Omega$  beträgt.

$$R_{Probe} = \frac{U_R}{I - I_U} \quad (C.2)$$

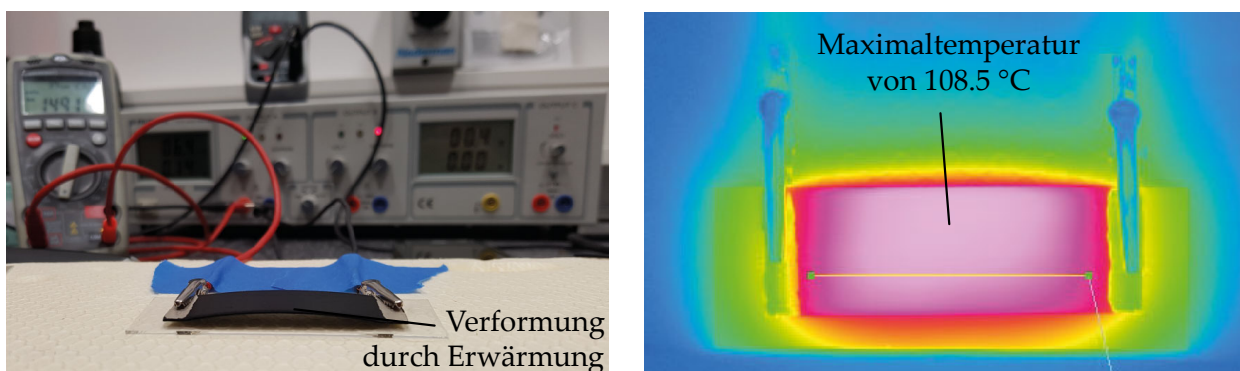
$$I_U = \frac{U_R}{R_{Impedanz}} \quad (C.3)$$

Tabelle C.2 enthält die Prozessparametersätze, welche in einem möglichst niedrigen spezifischen Widerstand und einer geringen Standardabweichung resultiert haben. Die Ermittlung wurde anhand von Probekörpergeometrie (a) durchgeführt (siehe Abbildung C.3). Diese Prozessparametersätze werden zur Fertigung der Probekörpergeometrie (b) genutzt (vgl. Abbildung C.3), um u.a. die Strom-Spannungs-Kennlinien und die Wärmeemission zu charakterisieren. Pro Material wird für jede der drei untersuchten Rasterwinkel ein Prozessparameter ausgewählt.

**Tabelle C.2:** Übersicht der Prozessparameter mit niedrigem spezifischen Widerstand und geringer Standardabweichung pro Kombination aus Material und Füllmusterorientierung (basierend auf [Wat19a])

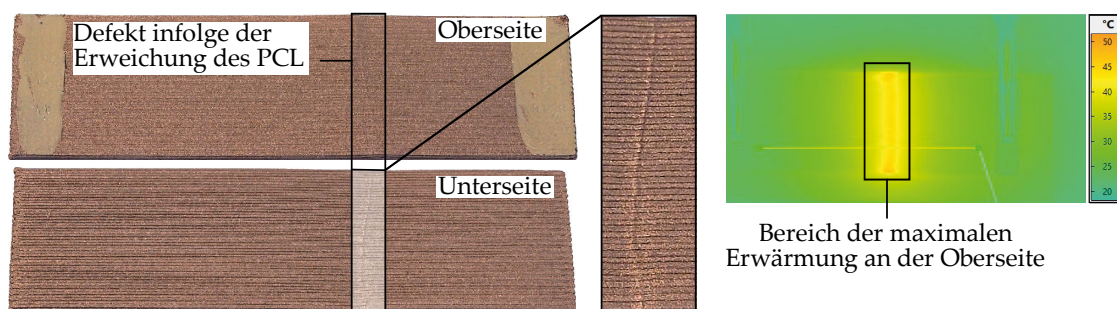
Material	Füllmusterorientierung	Extrusionstemperatur	Verfahrgeschwindigkeit	Flussrate
PPC	0°	240 °C	20 mm/s	105
	±45°	240 °C	20 mm/s	105
	90°	240 °C	20 mm/s	105
3dk	0°	240 °C	20 mm/s	105
	±45°	240 °C	20 mm/s	105
	90°	240 °C	20 mm/s	100
FFE	0°	240 °C	60 mm/s	105
	±45°	240 °C	60 mm/s	100
	90°	240 °C	60 mm/s	105
M3D	0°	170 °C	20 mm/s	105
	±45°	170 °C	40 mm/s	105
	90°	170 °C	20 mm/s	105

Abbildung C.5 zeigt die Verformung einer Probe aus FFE, welche aufgrund des Überschreitens der Erweichungstemperatur des Matrixpolymers (PLA) und des entstehenden Temperaturgradienten zwischen der Kontaktierung/Einspannung und dem Probenmittelstück infolge des Anlegens einer Spannung von 12 V auftritt. Es tritt keine Schädigung der Probe auf, sodass der Probenwiderstand nahezu unverändert bleibt.



**Abbildung C.5:** Verformung einer Probe aus FFE (Füllmusterorientierung 0°) und der maximalen Oberflächentemperatur infolge der Erwärmung nach Anlegen einer Spannung von 12 V (basierend auf [Wat19a])

Der steile Anstieg des elektrischen Widerstands der Proben aus M3D ist auf eine Erweichung des Matrixpolymers (PCL) zurückzuführen, welche in einem Defekt der Probe auf der Ober- und Unterseite resultiert (siehe Abbildung C.6). Aufgrund des erhöhten Widerstands in diesem Bereich tritt dort die maximale Oberflächentemperatur auf, was im Wärmebild deutlich sichtbar ist.



**Abbildung C.6:** Schädigung der Probe, gefertigt aus M3D auf der Ober- und Unterseite infolge der Erweichung des Matrixpolymers bei der Erwärmung (vgl. [Wat19a])

## BERICHTE AUS DEM INSTITUT

Die aufgeführten Berichte aus dem Institut für Konstruktionslehre, Maschinen- und Feinwerkelemente bzw. aus dem Institut für Konstruktionstechnik sind, sofern kein Verlag angegeben ist, wie folgt zu beziehen:

Technische Universität Braunschweig  
Institut für Konstruktionstechnik  
Langer Kamp 8  
38106 Braunschweig

## Berichte aus dem Institut für Konstruktionslehre, Maschinen- und Feinwerkelemente

Nr.	Bericht
1	<b>Gerber, Heinz:</b> Ein Beitrag zur Konstruktionsmethodik. Dissertation TU Braunschweig 1971.
2	<b>Lorenz, Dieter:</b> Das elastische Gelenk als statisch bestimmtes Modell. Dissertation TU Braunschweig 1972.
3	<b>Simonek, Rüdiger:</b> Ein Beitrag zur Ermittlung der speziellen Funktionsstruktur in der Konstruktion. Dissertation TU Braunschweig 1974.
4	<b>Wilhelms, Werner:</b> Untersuchung von ebenen viergliedrigen Gelenkgetrieben mit Federverspannung zur Erzielung vorgegebbarer Gleichgewichtslagen. Dissertation TU Braunschweig 1974.
5	<b>Roth, Karlheinz:</b> Die logische Schluß-Matrix, ein Algorithmus zur Analyse und Synthese von Verbindungen und Führungen in der Konstruktion. Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 1 Nr. 35 1974. VDI-Verlag, Düsseldorf.
6	<b>Gießner, Frank:</b> Gesetzmäßigkeiten und Konstruktionskataloge elastischer Verbindungen. Dissertation TU Braunschweig 1974.
7	<b>Trapp, Hans-Jürgen:</b> Analyse von Diagrammen der Zweiflanken-Wälzprüfung evolventischer Zahnräder mit Hilfe der rechnerischen Simulation des Wälzvorganges. Dissertation TU Braunschweig 1975.
8	<b>Verschiedene Autoren:</b> Konstruktionsmethodik am Institut für Konstruktionslehre, Maschinen und Feinwerkelemente. Veröffentlichungen 1965 bis 1975 TU Braunschweig 1975.
9	<b>Andresen, Uwe:</b> Ein Beitrag zum methodischen Konstruieren bei der montagegerechten Gestaltung von Teilen der Großserienfertigung. Dissertation TU Braunschweig 1975.
10	<b>Ersoy, Metin:</b> Wirkfläche und Wirkraum, Ausgangselemente zum Ermitteln der Gestalt beim rechnergestützten Konstruieren. Dissertation TU Braunschweig 1975.
11	<b>Mette, Manfred:</b> Einfluß der Reibung auf die Änderung der Zahnkraft über dem Eingriff bei geradzahnten Stirnrädern unter Berücksichtigung der Massenverhältnisse. Dissertation TU Braunschweig 1975.
12	<b>Naescher, Jürgen:</b> Die rechnerische Simulation und die Messung der Einflanken- Wälzabweichung geradzahnter Stirnräder. Dissertation TU Braunschweig 1977.
13	<b>Franke, Hans-Joachim:</b> Untersuchungen zur Algorithmisierbarkeit des Konstruktionsprozesses. Dissertation, Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 1 Nr. 47 1976. VDI-Verlag, Düsseldorf.
14	<b>Müller, Erich:</b> Modellentwicklung für die Synthese Mechanischer Konstruktionen. Dissertation TU Braunschweig 1978.
15	<b>Verschiedene Autoren:</b> Veröffentlichungen des Instituts für Konstruktionslehre, Maschinen- und Feinwerkelemente 1975 bis 1979. TU Braunschweig 1979.
16	<b>Birkhofer, Herbert:</b> Analyse und Synthese der Funktionen technischer Produkte. Dissertation, Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 1 Nr. 70 TU Braunschweig 1980. VDI-Verlag, Düsseldorf.
17	<b>Scholz, Gerhard:</b> Verschleißuntersuchungen an thermoplastischen Kunststoffzahnradern der Feinwerktechnik in der Paarung Stahl/Kunststoff. Dissertation TU Braunschweig 1980.
18	<b>Diekhöner, Günther W.:</b> Erstellen und Anwenden von Konstruktionskatalogen im Rahmen des methodischen Konstruierens. Dissertation, Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 1 Nr. 75 TU Braunschweig 1981.
19	<b>Jakobs, Gerhard:</b> Rechnerunterstützung bei der Geometrisch-Stofflichen Produktgestaltung. Dissertation TU Braunschweig 1981.
20	<b>Haupt, Ulrich:</b> Keilschrägverzahnung für Getriebe mit einstellbarem Verdrehflankenspiel. Dissertation 1981.

Nr.	Bericht
21	<b>Kollenrott, Friedrich:</b> Ein Verfahren zur Ermittlung von Zahnformen höchster Tragfähigkeit für Evolventen-Geradverzahnungen. Dissertation TU Braunschweig 1981.
22	<b>Höffler, Hans-Otto:</b> Konstruktionsregeln als methodische Hilfsmittel für die Gestaltung. Dissertation TU Braunschweig 1982.
23	<b>Bohle, Detlef:</b> Rechnerunterstütztes Konstruieren im Rahmen des Algorithmischen Auswahlverfahrens zur Konstruktion mit Katalogen. Dissertation TU Braunschweig 1982.
24	<b>Mende, Hasso:</b> Auslegung und Flankenkorrektur von Evolventenschragverzahnungen mit kleiner Ritzelzahnzahl. Dissertation TU Braunschweig 1982.
25	<b>Verschiedene Autoren:</b> Veröffentlichungen des Instituts für Konstruktionslehre, Maschinen- und Feinwerkelemente 1979 bis 1983. TU Braunschweig 1984.
26	<b>Farny, Bernd:</b> Rekonstruktion eines 3D-Geometriemodells aus Orthogonalprojektionen beim rechnerunterstützten Konstruieren. Dissertation TU Braunschweig 1985.
27	<b>Kopowski, Eckart:</b> Analyse und Konstruktionskataloge fester Verbindungen. Dissertation TU Braunschweig 1985.
28	<b>Verschiedene Autoren:</b> Institut für Konstruktionslehre, Maschinen- und Feinwerkelemente, Veröffentlichungen auf dem Verzahnungsgebiet 1965 bis 1984. 1985.
29	<b>Pabst, Ludwig:</b> Rechnerunterstützte Auslegung von Evolventenstirnradpaarungen höchster Tragfähigkeit. Dissertation TU Braunschweig 1986.
30	<b>Klausnitz, Detlef:</b> Methoden zur Analyse und Synthese beweglicher Verbindungen und ihre Eignung zur Rechnerunterstützten Konstruktion. Dissertation TU Braunschweig 1988.
31	<b>Verschiedene Autoren:</b> Veröffentlichungen des Instituts für Konstruktionslehre, Maschinen- und Feinwerkelemente 1984 bis 1988. TU Braunschweig 1988.
32	<b>Zierau, Steffen:</b> Die geometrische Auslegung konischer Zahnräder und Paarungen mit parallelen Achsen. Dissertation TU Braunschweig 1989.
33	<b>Petersen, Detlev:</b> Auswirkung der Lastverteilung auf die Zahnfußtragfähigkeit von hoch überdeckenden Stirnradpaarungen. Dissertation TU Braunschweig 1989.
34	<b>Sieverding, Hubert:</b> Methoden und Hilfsmittel zum Modellübergang beim rechnerunterstützten methodischen Konstruieren. Dissertation TU Braunschweig 1990.
35	<b>Brückner, Thomas:</b> Auslegung und Optimierung von Komplementprofilverzahnungen nach vorgebbaren Eigenschaften. Dissertation 1990.
36	<b>Derhake, Thomas:</b> Methodik für das rechnerunterstützte Erstellen und Anwenden flexibler Konstruktionskataloge. Dissertation TU Braunschweig 1990.

## Berichte aus dem Institut für Konstruktionstechnik

Nr.	Bericht
37	<b>Barrenschenn, Jörg:</b> Die systematische Ausnutzung von Symmetrieeigenschaften beim Konstruieren. Dissertation TU Braunschweig 1990.
38	<b>Drebing, Uwe:</b> Zur Metrik der Merkmalsbeschreibung für Produktdarstellende Modelle beim Konstruieren. Dissertation TU Braunschweig 1991.
39	<b>Weigel, Klaus D.:</b> Entwicklung einer modularen Systemarchitektur für die rechnerintegrierte Produktgestaltung. Dissertation TU Braunschweig 1991.
40	<b>Steffens, Ralf:</b> Die Profilsteigungsfunktion, ein neuer Weg zur analytischen Bestimmung und Optimierung allgemeiner Profilflankenpaarungen. Dissertation TU Braunschweig 1993.
41	<b>Verschiedene Autoren:</b> Veröffentlichungen des Instituts für Konstruktionslehre, Maschinen- und Feinwerkelemente 1989 bis 1993. TU Braunschweig 1993.
42	<b>Böwer, Gunnar:</b> Untersuchung der konzeptionellen Erweiterungsmöglichkeiten von CAD-Systemen am Beispiel der rechnerunterstützten Bemaßungsanalyse und Toleranzberechnung. Dissertation TU Braunschweig 1993.
43	<b>Speckhahn, Hermann:</b> Systeme zur flexibel konfigurierbaren Informationsbereitstellung für die Konstruktion. Dissertation TU Braunschweig 1995.
44	<b>Kickermann, Heiner:</b> Rechnerunterstützte Verarbeitung von Anforderungen im methodischen Konstruktionsprozeß. Dissertation TU Braunschweig 1995.
45	<b>Bielfeldt, Uwe:</b> Ein Beitrag zur konstruktionsmethodischen Entwicklung von Pumpen für die Biotechnologie. Dissertation TU Braunschweig 1996.
46	<b>Hacker, Günther:</b> Untersuchungen zur methodischen Gestaltung von Maschinengehäusen. Dissertation TU Braunschweig 1996. Cuvillier Verlag, Göttingen, ISBN 3-89588-609-2.
47	<b>Fischer, Rolf:</b> Product Design based on HyperTrees. Dissertation TU Braunschweig 1996.



Nr.	Bericht
48	<b>Renken, Martin:</b> Nutzung recyclingorientierter Bewertungskriterien während des Konstruierens. Dissertation TU Braunschweig 1996. Cuvillier Verlag, Göttingen, ISBN 3-89588-555-X.
49	<b>Schulz, Achim:</b> Systeme zur Rechnerunterstützung des funktionsorientierten Grobentwurfs. Dissertation TU Braunschweig 1996.
50	<b>Tsai, Shyi-Jeng:</b> Vereinheitlichtes System evolventischer Zahnräder: Auslegung von Zylindrischen, Konischen, Kronen- und Torusrädern. Dissertation TU Braunschweig 1997.
51	<b>Peters, Michael:</b> Kommunikationssystem rechnerunterstützter Konstruktionswerkzeuge. Dissertation TU Braunschweig 1998.
52	<b>Jeschke, Andrea:</b> Beitrag zur wirtschaftlichen Bewertung von Standardisierungs- Maßnahmen in der Einzel- und Kleinserienfertigung durch die Konstruktion. Dissertation TU Braunschweig 1997.
53	<b>Lachmayer, Roland:</b> Temperatur- und wärmeflußgerechte Gestaltung axialer Gleitringdichtungen. Dissertation TU Braunschweig 1997. Shaker Verlag, Aachen, ISBN 3-8265-3513-8.
54	<b>Döllner, Gernot:</b> Konzipierung und Anwendung von Maßnahmen zur Verkürzung der Produktentwicklungszeit am Beispiel der Aggregateentwicklung. Dissertation TU Braunschweig 1997.
55	<b>Kaletka, Ingo:</b> Zielgerichtetes Entwickeln im Methodischen Konstruktionsprozeß durch Verwendung ganzheitlicher Modelle. Dissertation TU Braunschweig 1999. Cuvillier Verlag, Göttingen, ISBN 3-89712-386-X.
56	<b>Franke, H.-J., Krusche, T. und Mette, M.:</b> Konstruktionsmethodik – Quo vadis? Symposium anlässlich des 80. Geburtstags von Prof. Dr.-Ing. Karlheinz Roth. 1999. Shaker.
57	<b>Lippardt, Sven:</b> Gezielte Förderung der Kreativität durch bildliche Produktmodelle. Dissertation TU Braunschweig 2000. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1 Nr. 325, VDI-Verlag, Düsseldorf, ISBN 3-18-332501-2.
58	<b>Fritsch, Joachim:</b> Erhöhung der Betriebssicherheit vollkeramischer Wälzlager unter vollständiger Umströmung mit niedrigviskosem Medium. Dissertation TU Braunschweig 2000. Shaker Verlag, Aachen, ISBN 3-8265-7456-7.
59	<b>Kramer, Manfred:</b> Systematische Werkstoffauswahl im Konstruktionsprozeß am Beispiel von Kunststoffbauteilen im Automobilbau. Dissertation TU Braunschweig 2000.
60	<b>Krusche, Thomas:</b> Strukturierung von Anforderungen für einen effizienten und effektiven Konstruktionsprozeß. Dissertation TU Braunschweig 2000. Verlag Mainz, Aachen, ISBN 3-89653-796-2.
61	<b>Lux, Stefan:</b> Entwicklung rechnerunterstützter Angebotssysteme mit generischen Methoden. Dissertation TU Braunschweig 2001. Verlag Mainz, Aachen, ISBN 3-89653-856-X.
62	<b>Hagedorn, Uwe:</b> Reibungsverluste von vollständig mit niedrigviskosem Medium umströmten Wälzlagern. Dissertation TU Braunschweig 2001. Shaker Verlag, Aachen, ISBN 3-8265-9419-3.
63	<b>Brey, Marco:</b> Konfiguration und Gestaltung mit Constraintsystemen. Dissertation TU Braunschweig 2003. Cuvillier Verlag, Göttingen, ISBN 3-89873-643-1.
64	<b>Köberlein, Steffen:</b> Systematische wettbewerbsorientierte Produktentwicklung. Dissertation TU Braunschweig 2003. Cuvillier Verlag, Göttingen, ISBN 3-89873-922-8.
65	<b>Firchau, Norman L.:</b> Variantenoptimierte Produktgestaltung. Dissertation TU Braunschweig 2003. Cuvillier Verlag, Göttingen, ISBN 3-89873-934-1.
66	<b>Pini, P. und Germer, C.:</b> Konstruktionsmethodik in der Praxis – Einsatzmöglichkeiten und Grenzen: Kolloquium anlässlich des 60. Geburtstags von Prof. Dr.-Ing. H.-J. Franke. 2004.
67	<b>Otremba, Robert:</b> Systematische Entwicklung von Gelenken für Parallelroboter. Dissertation TU Braunschweig 2005. Logos Verlag, Berlin, ISBN 3-8325-0811-2.
68	<b>Germer, Christoph:</b> Interdisziplinäres Toleranzmanagement. Dissertation TU Braunschweig 2005. Logos Verlag, Berlin, ISBN 3-8325-0954-2.
69	<b>Kroker, Jens:</b> Schnittstellensystematik für modulare Fahrzeugkarosserien. Dissertation TU Braunschweig 2005. Logos Verlag, Berlin, ISBN 3-8325-1096-6.
70	<b>Wandelt, Dennis:</b> Modellierung von mehrstufigen Fertigungsprozessen zur mehrdimensionalen Toleranzanalyse und -synthese. Dissertation TU Braunschweig 2007. Logos Verlag, Berlin, ISBN 978-3-8325-1638-3.
71	<b>Deimel, Markus:</b> Ähnlichkeitskennzahlen zur systematischen Synthese, Beurteilung und Optimierung von Konstruktionslösungen. Dissertation TU Braunschweig 2007. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, ISBN 978-3-18-339801-0.
72	<b>Koschorrek, Ralph:</b> Systematisches Konzipieren mittels Ähnlichkeitsmethoden am Beispiel von PKW-Karosserien. Dissertation TU Braunschweig 2007. Logos Verlag, Berlin. ISBN 978-3-8325-1784-7.
73	<b>Löffler, Stefan:</b> Anwenden bionischer Konstruktionsprinzipie in der Produktentwicklung. Dissertation TU Braunschweig 2009. Logos Verlag, Berlin, ISBN 978-3-8325-2154-7.
74	<b>Haupt, U. und Sánchez Ruelas, J. G.:</b> Konstruktionsmethodik für Fahrzeugkonzepte: Kolloquium anlässlich des Ausscheidens von Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Franke aus dem aktiven Dienst und Übergabe des Instituts an Prof. Dr.-Ing. Thomas Victor. 2010. ITS Niedersachsen.

Nr.	Bericht
75	<b>Stechert, Carsten:</b> Modellierung komplexer Anforderungen. Dissertation TU Braunschweig 2010. Verlag Dr. Hut, München, ISBN 978-3-86853-545-7.
76	<b>Grotkamp, Stefanie:</b> Bewertung von Produktstrukturkonzepten im Variantenmanagement. Dissertation TU Braunschweig 2010. Verlag Dr. Hut, München, ISBN 978-3-86853-624-9.
77	<b>Alexandrescu, Irène:</b> Werkzeuge für die rechnerbasierte Konfiguration kundenspezifischer Produkte. Dissertation TU Braunschweig 2011. Verlag Dr. Hut, München, ISBN 978-3-86853-805-2.
78	<b>Straube, Dima:</b> CAD-Features für die Entwicklung von Mikrosystemen. Dissertation TU Braunschweig 2011. Verlag Dr. Hut, München, ISBN 978-3-86853-927-1.
79	<b>Pavlović, Nenad:</b> Entwicklung von adaptiven Drehgelenken für Parallelstrukturen. Dissertation TU Braunschweig 2011. Verlag Dr. Hut, München, ISBN 978-3-8439-0148-2.
80	<b>Kirchner, Karsten:</b> Entwicklung eines Informationssystems für den effizienten Einsatz generativer Fertigungsverfahren im Produktentwicklungsprozess. Dissertation TU Braunschweig 2011. Verlag Dr. Hut, München, ISBN 978-3-8439-0212-0.
81	<b>Brocke, Thomas:</b> Konzept zur Komplexitätsbeherrschung in der Automobilindustrie. Dissertation TU Braunschweig 2011. Verlag Dr. Hut, München, ISBN 978-3-8439-0250-2.
82	<b>Borgmann, Jan P.:</b> Sicherheit bei Fahrzeugüberschlägen für nicht angegurtete Insassen. Dissertation TU Braunschweig 2012. Verlag Dr. Hut, München, ISBN 978-3-8439-0409-4.
83	<b>Ziebart, Jan R.:</b> Ein konstruktionsmethodischer Ansatz zur Funktionsintegration. Dissertation TU Braunschweig 2012. Verlag Dr. Hut, München, ISBN: 978-3-8439-0567-1.
84	<b>Hammad, F. M. K.:</b> Dimensionen der Gestaltwerdung: Ein Beitrag zur Systematik der Produktentwicklung. Dissertation TU Braunschweig 2012. Verlag Dr. Hut, München, ISBN 978-3-8439-0853-5.
85	<b>Müller, Philipp J.:</b> Konstruktionsmethode zur integrativen Ausführung von Bauteilen aus kohlefaserverstärktem Kunststoff im Automobilbau. Dissertation TU Braunschweig 2013. Verlag Dr. Hut, München, ISBN 978-3-8439-1362-3.
86	<b>Nehius, Frank:</b> Methodische Unterstützung bei der Ermittlung von Anforderungen in der Produktentwicklung. Dissertation TU Braunschweig 2012. Verlag Dr. Hut, München, ISBN 978-3-8439-1560-1.
87	<b>Türck, Eiko:</b> Systematische Abbildung der Produktlogik für wissensbasiertes Konzipieren komplexer Produkte. Dissertation TU Braunschweig 2016. Verlag Dr. Hut, München, ISBN 978-3-8439-2599-0.
88	<b>Inkermann, David:</b> Anwendung adaptronischer Lösungsprinzipien für die Entwicklung adaptiver Systeme. Dissertation TU Braunschweig 2017. Verlag Dr. Hut, München, ISBN 978-3-8439-2997-4.
89	<b>Tschech, Matthias:</b> Methodik zur Auslegung kosteneffizienter Lithium-Ionen-Zellen für ein Fahrzeugportfolio. Dissertation TU Braunschweig 2017. Verlag Dr. Hut, München, ISBN 978-3-8439-3130-4.
90	<b>Prüß, Hauke:</b> Gestaltung und generative Fertigung von Faser-Kunststoff-Verbunden. Dissertation TU Braunschweig 2017. Verlag Dr. Hut, München, ISBN 978-3-8439-3193-9.
91	<b>Bavendiek, Ann-Kathrin:</b> Adaption of engineering design methods for multi-disciplinary development processes considering heterogeneous teams. Dissertation TU Braunschweig 2018. Verlag Dr. Hut, München, ISBN 978-3-8439-3713-9.
92	<b>Hartogh, Peter:</b> Generische Vorhersage von Fertigungsmerkmalen additiv herzustellender Produkte. Dissertation TU Braunschweig 2018. Verlag Dr. Hut, München, ISBN 978-3-8439-3749-8.
93	<b>Lu, Weijun:</b> A Model-based Approach for Robust Design in the Conceptual Phase of Product Development. Dissertation TU Braunschweig 2018. Verlag Dr. Hut, München, ISBN 978-3-8439-3914-0.